



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco

**Optimización de la geometría externa de la buza del molde para colada
continua de planchón de acero**

Maestría en Ingeniería de Procesos

I.Q.M Rodrigo Hernández Santoyo

Director de Tesis:

Dr. Jesús Isidro González Trejo

Departamento de Sistemas, UAM-A

Co-director de Tesis:

Dr. Cesar Augusto Real Ramírez

Departamento de Sistemas, UAM-A



Tabla de Contenido

1	Introducción	3
1.1	Antecedentes históricos.....	3
1.2	Principio de funcionamiento de la colada continua.....	4
1.3	Descripción de los fenómenos básicos dentro del molde	5
1.4	Formulación de los modelos	7
2	Estado del arte del problema	8
3	Planteamiento del problema	12
4	Justificación	12
5	Modelado matemático.....	14
5.1	Ecuaciones de Navier-Stokes	14
5.1.1	Condiciones de frontera	15
5.1.2	Modelos de Turbulencia.....	16
5.2	Análisis dimensional.....	23
5.2.1	Teorema de Pi-Buckingham	23
5.2.2	Números adimensionales de importancia en Mecánica de Fluidos.....	26
6	Objetivos e hipótesis	28
6.1	Objetivo general.....	28
6.2	Objetivos específicos.....	28
6.3	Hipótesis.....	28
7	Metodología	29
7.1	Construcción de la geometría	29
7.2	Discretización	30
7.3	Condiciones de frontera.....	31
7.4	Solución del modelo.....	32
7.5	Post-procesamiento	32
7.6	Validación	32
8	Resultados y análisis.....	34
9	Conclusiones.....	47
10	Trabajo a futuro y perspectivas.....	48
11	Bibliografía	49

Índice de Figuras.

Figura 1.1 Máquina de CC ideada por Bessemer.	4
Figura 1.2 Máquina de CC de cinturón	5
Figura 1.3 Descripción esquemática de los fenómenos asociados con la colada de planchón de acero.....	6
Figura 1.4 Esquema del patrón de flujo típico dentro del molde de CC	6
Figura 2.1 Gráfico de vectores de velocidad de (a) Simulación con LES y (b) Medición con PIV	8
Figura 2.2 Esquema de patrón de flujo con MFCD “B”	
Figura 2.3 Esquema de patrón de flujo con MFCD “A”	
Figura 5.1 Bosquejo del valor de $U(n)$ de la variable aleatoria de velocidad U con respecto al número de repeticiones de un experimento de flujo turbulento.....	16
Figura 5.2 Perfil de $\sqrt{v_{T\epsilon\kappa}^2} = c_{CD}$ de una simulación DNS de flujo en canal con $Re=13,750$	22
Figura 7.1 Se muestra como se sustrae el volumen de la buza de modo que solo se discretiza la parte fluida	30
Figura 7.2 Muestra la localización en el modelo de las condiciones de frontera	31
Figura 8.1 Modelo de referencia en estado estable. La escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.	34
Figura 8.2 Contornos de velocidad para modelo de referencia en estado estable.	35
Figura 8.3 Contornos de velocidad para modelo de referencia en estado transitorio.	35
Figura 8.4 Modelo de referencia en estado transitorio (30 s). La escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.	35
Figura 8.5 Muestra los resultados en estado estable del comportamiento del jet para el modelo de referencia	37
Figura 8.6 Muestra los resultados en estado transitorio del comportamiento del jet para el modelo de referencia	37
Figura 8.7 Campo de velocidad resultante para Caso 1, espesor de deflector 18 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.....	38
Figura 8.8 Campo de velocidad resultante para Caso 1, espesor de deflector 6 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.....	39
Figura 8.9 Contornos de velocidad para Caso 1, espesor de deflector 18 mm.....	40
Figura 8.10 Contornos de velocidad para Caso 1, espesor de deflector 6 mm	40
Figura 8.11 Campo de velocidad resultante para Caso 2, espesor de deflector 18 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.....	41
Figura 8.12 Campo de velocidad resultante para Caso 2, espesor de deflector 6 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.	42
Figura 8.13 Contornos de velocidad para Caso 2, espesor de deflector 18 mm	42
Figura 8.14 Contornos de velocidad para Caso 2, espesor de deflector 6 mm	42
Figura 8.15 Campo de velocidad resultante para Caso 3, espesor de deflector 18 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.	43
Figura 8.16 Campo de velocidad resultante para Caso 3, espesor de deflector 6 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.	44

Figura 8.17 Contornos de velocidad para Caso 3, espesor de deflector 18 mm	44
Figura 8.18 Contornos de velocidad para Caso 3, espesor de deflector 6 mm	44
Figura 8.19 Superficie libre generada en el modelo físico usando una buza bifurcada tradicional .	45
Figura 8.20 Superposición de la figura anterior y la superficie en reposo.....	45
Figura 8.21 Fluctuaciones de nivel usando deflector (caso3)	46
Figura 8.22 Superposición de molde entre estado en reposo y usando deflector (Caso 3)	46
Figura 10.1 Figura que muestra la forma de la buza de planchón delgado	48

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Fallas inherentes de cada patrón de flujo.....	8
Tabla 7-1 Dimensiones del molde de referencia.....	29
Tabla 7-2 Modelo con deflectores.....	30

Abreviaturas y símbolos

CC	Colada Continua
DNS	Direct Numerical Simulation
DP	Dual phase
LES	Large Eddy Simulation
MFCD	Mold Flow Control Device
PIV	Particle Image Velocimetry
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWIP	Transformation Twinning Induced Plasticity

Símbolos

C_μ	Constante de viscosidad turbulenta para el modelo κ - ϵ
D/D_t	derivada material
\bar{D}/\bar{D}_t	derivada material promedio
ρ	rapidez de producción de energía cinética turbulenta
Re	número de Reynolds
$U(t)$	proceso aleatorio
$U(x,t)$	Velocidad euleriana
x_i	componente de la posición
g	aceleración gravitacional
κ	energía cinética turbulenta
l	longitud de escala
l_m	longitud de mezclado
$u(x,t)$	velocidad fluctuante
$u_i u_j$	componentes de los esfuerzos de Reynolds
Γ	Difusividad molecular

Γ_{eff}	difusividad efectiva
Γ_T	difusividad turbulenta
δ_{ij}	deltade Kronecker
ε	rapidez de disipación de energía cinética turbulenta
μ	viscosidad
ν	viscosidad cinemática
ν_{eff}	viscosidad efectiva
ρ	densidad
σ	número de Prandtl
σ_k	número de Prandtl turbulento para la energía cinética
τ	escala de tiempo turbulento
τ_{ij}	tensor de esfuerzos
ϕ	escalar conservativo
ϕ'	componente fluctuante
$\langle Q \rangle_T$	promedio en el tiempo de $Q(t)$ sobre un intervalo de tiempo T
$\langle Q \rangle_N$	promedio de Q sobre un ensamble de N muestras
∇	operador gradiente
$\nabla \cdot$	operador divergencia
∇^2	operador laplaciano

Resumen

Hoy en día, el acero sigue siendo el material de más amplio uso en todas las ramas de la industria, si bien, nuevos materiales se han desarrollado, estos aún no pueden sustituir al acero debido a su amplio rango de propiedades mecánicas que puede ofrecer, además en los últimos años se han seguido desarrollando diversos tipos de aceros como los aceros de alta resistencia de última generación como TRIP, TWIP y DP que permiten una reducción de peso considerable en aplicaciones estructurales. Es por esta razón que el proceso de colada continua sigue siendo de importancia fundamental en la industria. De aquí que la mejora de la calidad del proceso de colada continua sea fundamental. Los defectos que afectan de manera importante la calidad del acero son las inclusiones no metálicas causadas durante el vaciado en el molde de CC por arrastre de escoria. Para disminuir este defecto se han propuesto distintas alternativas como el uso del freno electromagnético. El problema del freno electromagnético es que resulta costoso y difícil de operar. En este trabajo se propone una solución simple y de bajo costo que según veremos resulta eficiente para disminuir el arrastre de escoria. Si bien, hace falta más investigación para su implementación, los resultados obtenidos durante la investigación aportan evidencia de que desde el punto de vista de la mecánica de fluidos es posible su uso. La solución aquí presentada consiste en el uso de un deflector de flujo externo rectangular que forma parte de la buza bifurcada, que tiene como intención provocar un patrón de flujo cuasi-simétrico que impida la formación de fluctuaciones, las cuales a su vez, son las responsables en gran medida del arrastre de escoria que puede generar defectos internos o superficiales en el acero durante su solidificación después del vaciado en el molde de CC.

1 Introducción

1.1 Antecedentes históricos

El proceso de colada continua se ha venido utilizando en la industria siderúrgica de la manera como la conocemos actualmente desde hace aproximadamente 60 años, sin embargo, sus orígenes se remontan al siglo XIX. En 1856 Henry Bessemer sugirió un método de colada continua ó CC.) como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

La idea de Bessemer fue vaciar metal fundido entre dos rodillos enfriados por agua. El proceso resultó ser muy difícil de controlar y el único éxito que tuvo fue en la producción de unas placas de muy baja calidad. A finales del siglo XIX, la idea de Bessemer fue retomada para el desarrollo de nuevos procesos que involucraban a metales no ferrosos. Durante los siguientes 30 años de trabajo experimental estos métodos fueron mejorados hasta que se pudieron implementar a escala

industrial. Durante las décadas de los 30's y 40's del siglo pasado, dichos métodos fueron ampliamente utilizados para la producción de metales no ferrosos. En 1943 el científico alemán Junghans mostró un nuevo proceso desarrollado de colada continua de acero a escala planta piloto utilizando una maquina vertical. A partir de esto, comenzó un amplio desarrollo de plantas piloto utilizando la maquina desarrollada por Junghans. Hoy en día la colada continua de acero es un método bien establecido. El desarrollo ha sido tal que el proceso de colada continua es utilizado actualmente para producir el 95% de la producción mundial de acero por año.

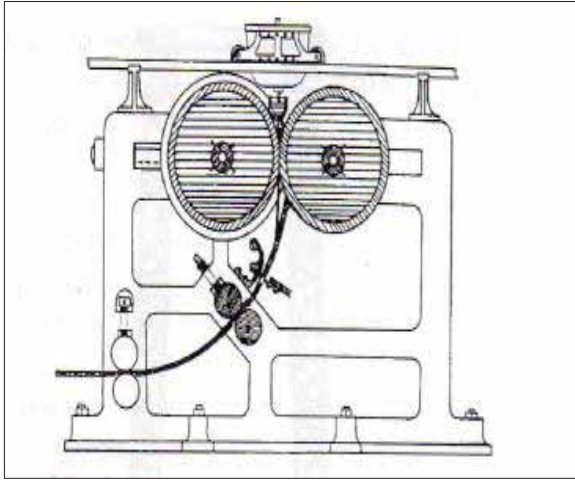


Figura 1.1 Máquina de CC ideada por Bessemer. (Fredriksson and Akerlind 2006)

1.2 Principio de funcionamiento de la colada continua

El principio de funcionamiento de la colada continua es simple. El acero fluye por gravedad de la olla hacia adentro del molde el cual es un contenedor intermedio para el acero fundido.

El metal fundido es vaciado continuamente desde el distribuidor hacia un molde vertical construido de cobre el cual es enfriado por agua, donde se forma una capa sólida de acero, que contiene al metal fundido en el centro. Simultáneamente el acero es extraído del fondo del molde de cobre. Durante el paso a través del molde de cobre, la capa solida debe formarse de modo tal que esta sea suficientemente estable como para mantener su forma mientras el metal es retirado continuamente.

Cuando la capa metálica abandona la zona del molde de cobre, esta entra a una zona de enfriamiento. El medio de enfriamiento es agua, la cual es espreada directamente en la periferia del planchón. Cerca y por debajo del molde existe una pequeña zona con espreado de agua muy intenso. Adicionalmente otras zonas de enfriamiento siguen a la primera. La cantidad de agua por unidad de tiempo en las zonas de enfriamiento disminuye a medida que nos alejamos de la zona del molde de cobre.

La rapidez de colada en la maquina vertical antigua era lenta, lo cual daba como resultado bajas tasas de producción, causando que fuera difícil justificar los altos costos de inversión. Para eliminar tales complicaciones, se idearon las máquinas de colada de cinturón ver Figura 1.2.

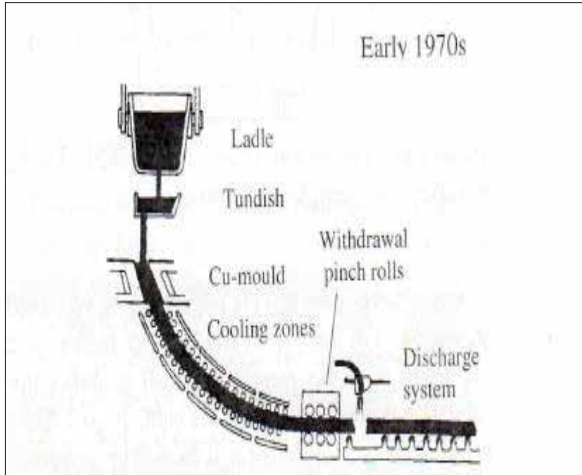


Figura 1.2 Máquina de CC de cinturón (Fredriksson and Akerlind 2006)

1.3 Descripción de los fenómenos básicos dentro del molde

Para tener un contexto fundamental del cual se pueda partir para desarrollar el proyecto, es necesario establecer de manera general los fenómenos que se desarrollan durante la etapa del proceso.

En la Figura 1.3 se muestra de manera general los fenómenos que gobiernan los procesos de colada continua, mismos que determinan la calidad del producto final. El acero fluye dentro del molde a través de los puertos de la buza, la cual, usualmente es bifurcada. Las altas velocidades producen números de Reynolds que exceden 100,000 por lo que se tiene un comportamiento completamente turbulento.

Es una práctica común el inyectar gas argón dentro de la buza para prevenir atascos. Las burbujas resultantes producen fuerzas de flotación que afectan de manera considerable el patrón de flujo, tanto en la buza como en el molde. Así mismo, colectan partículas que pueden quedar atrapadas en la capa solidificada, causando serios defectos superficiales en el producto final.

El jet que sale de la boquilla fluye a través del molde e incide contra la capa solidificada en la cara estrecha del molde. El jet transfiere una gran cantidad de calor, la cual puede erosionar la capa donde incide, o bien, crear zonas delgadas.

Típicamente, el jet incide en la cara estrecha del molde, donde se divide el flujo, causando que existan dos zonas de flujo, una que se dirige hacia la superficie libre de líquido y otra que se dirige hacia el fondo del molde causando que se generen dos zonas de recirculación como se ve en la Figura 1.4.

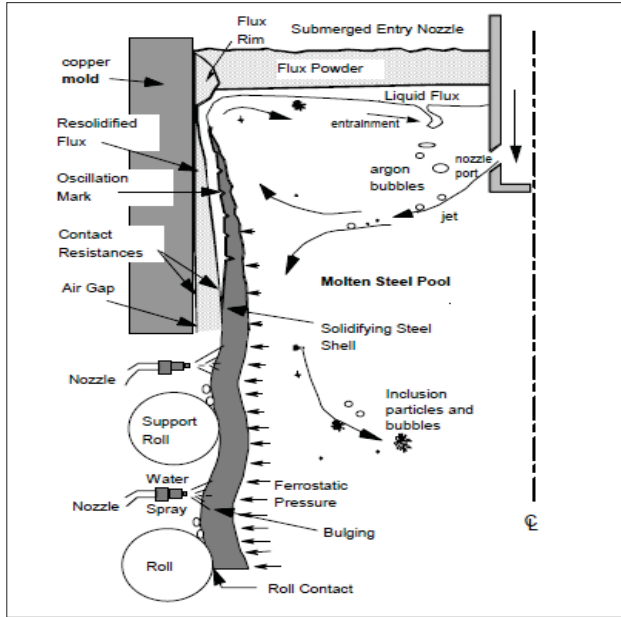


Figura 1.3 Descripción esquemática de los fenómenos asociados con la colada de planchón de acero

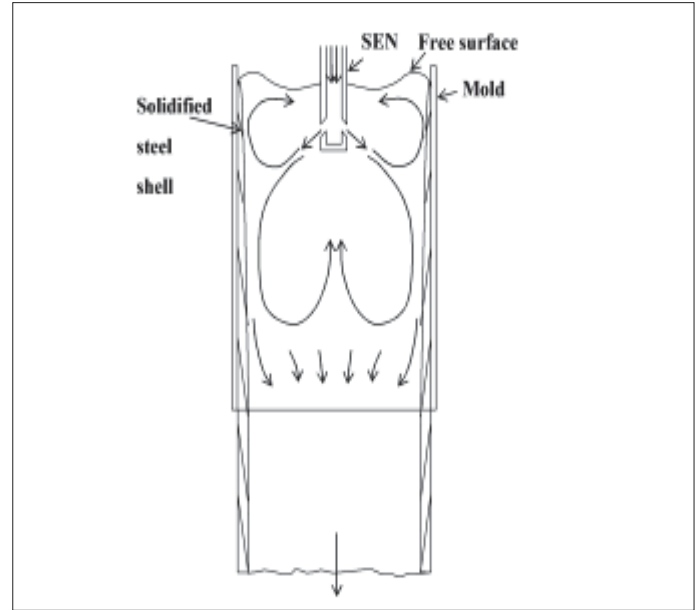


Figura 1.4 Esquema del patrón de flujo típico dentro del molde de CC (Sahai 2006)

El flujo de líquido a lo largo de la superficie libre del molde es muy importante para la calidad del acero. Una inadecuada cobertura con fundente líquido provoca una solidificación no uniforme y una gran variedad de defectos superficiales.

Por otro lado, si la velocidad horizontal superficial es muy grande, el esfuerzo cortante y los posibles vórtices que los acompañan pueden provocar que el fundente líquido entre dentro del acero.

El momentum vertical del jet de acero provoca que se levante la interface donde se encuentra la superficie libre del líquido. Esto tiene como consecuencia que el menisco de la parte estrecha del molde se eleve y provoque una variación en el nivel de la interfase, o lo que se conoce como “onda estacionaria”, a través del ancho del molde. La capa de fundente líquido tiende a volverse más delgada en los puntos más altos, provocando consecuencias perjudiciales. También las fluctuaciones en el flujo causan variaciones que dependen del tiempo en el nivel de la interfase que pueden provocar defectos superficiales tales como entrapamiento de polvo de fundente. Este nivel de fluctuaciones puede ser causado por movimiento turbulento aleatorio, o cambios en las condiciones de operación, tales como liberación de atascos repentinos dentro de la buza o bien grandes cantidades de burbujas de gas.

El acero fundido contiene inclusiones sólidas. Estas partículas pueden tener distintas formas y tamaños y se mueven a través del campo de flujo mientras chocan formando aglomerados que pueden ser arrastrados por las burbujas. Estos pueden circular hacia arriba en dirección al fundente

líquido en la superficie, o quedar atrapadas en la capa solidificada que pueden generar defectos internos causando que el producto final sea frágil.

El fundente se agrega en la parte superior de la superficie para aportar aislamiento térmico y químico para el acero fundido. Los fundentes que están constituidos básicamente por óxidos se sinterizan y funden en la parte superior del líquido para formar una capa que flota encima del acero líquido. La rapidez de fusión del fundente y la habilidad del mismo para fluir y absorber inclusiones de alúmina perjudiciales del acero depende de su composición, la cual a su vez, es gobernada por su termodinámica. Una parte de este fundente líquido se solidifica en la parte fría del molde, creando una zona abultada que inhibe la transferencia de calor hacia el menisco. Otra parte del fundente es consumida en la brecha que se forma entre el molde y la capa solidificada, donde se fomenta una transferencia de calor uniforme que ayuda a prevenir que la capa solidificada se pegue al molde.

Para ayudar a que el acero no se pegue al molde, este vibra con una oscilación periódica. Esta oscilación afecta las fluctuaciones del nivel y los defectos asociados. Así mismo, crea depresiones periódicas en la capa superficial, llamadas “marcas de oscilación”, que afectan la transferencia de calor y actúan como sitios de iniciación de grietas.

Ahora es tiempo de mencionar los efectos de la transferencia de calor. El flujo de calor se complica debido a los esfuerzos térmicos que pueden doblar la capa para crear una resistencia de contacto y nucleación de subenfriamiento, el cual acompaña la rápida solidificación y controla la microestructura inicial. La solidificación siguiente es gobernada principalmente por conducción y radiación a través de la brecha interfacial entre el acero solidificado y el molde. Esta brecha consiste principalmente de capas de fundente, las cuales se mueven hacia abajo a distintas velocidades. Esta se ve afectada de manera considerable por las resistencias de contacto, las cuales dependen de las propiedades del fundente y de la contracción y doblez de la capa solidificada, la cual puede crear una brecha de aire. A medida que la solidificación evoluciona, ocurre una microsegregación de elementos aleantes entre las dendritas conforme éstas crecen hacia fuera para formar granos columnares. Los elementos rechazados bajan la temperatura local de solidificación, dejando una capa delgada de acero líquido a lo largo de las fronteras de grano, que más tarde pueden provocar precipitados fragilizantes. Cuando el líquido alimentado no puede compensar la contracción debido a la solidificación, la contracción térmica, las transformaciones de fase y las fuerzas mecánicas generan esfuerzos. Cuando los esfuerzos de tensión concentrados en las capas de líquido son suficientemente altos para nuclear en la interfase de los gases disueltos, entonces se formarán grietas.

1.4 Formulación de los modelos

Se han aplicado modelos matemáticos para cuantificar e investigar los fenómenos anteriormente descritos en función de los parámetros de proceso controlables. Los modelos mecanísticos se basan en las leyes de conservación de calor, masa, fuerza y momentum en un dominio apropiado y con las condiciones de frontera adecuadas. Cada fenómeno considerado se modela por medio de las

ecuaciones gobernantes. Estas ecuaciones se discretizan utilizando diferencias finitas o elemento finito para resolverlas numéricamente.

Debido a que la complejidad en el modelado de los fenómenos dentro del molde son abrumadores, ningún modelo puede incluir todos los fenómenos a la vez. Por lo que un aspecto fundamental para obtener el desarrollo de un modelo de manera satisfactoria es la selección de los fenómenos clave y consideraciones razonables.

2 Estado del arte del problema

Como se mencionó en la sección 1.3, el estudio de la naturaleza de los fenómenos que se llevan a cabo dentro del molde es muy complejo y no se puede incluir en un solo modelo todo aquello que afecta al proceso. Por ello nos concentraremos en el modelado del patrón de flujo. Por ejemplo, (Thomas 2002) menciona que la forma del contorno de la superficie es gobernada por el patrón de flujo, el cual de hecho, afecta también la transferencia de calor en las capas de escoria, la solidificación del menisco, y la infiltración de escoria entre otros. Por otro lado, las fluctuaciones en el tiempo y las olas en la superficie superior son causadas por el patrón de flujo, el cual puede causar defectos superficiales entre otros problemas.

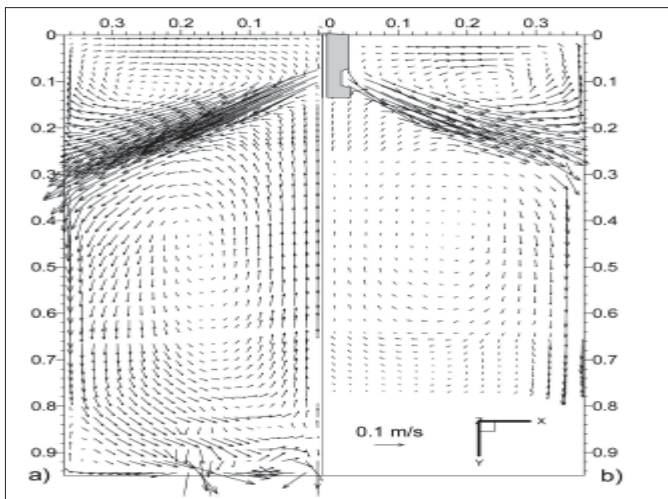


Figura 2.1 Gráfico de vectores de velocidad de (a) Simulación con LES y (b) Medición con PIV (Thomas 2002)

En años recientes se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios de modelado del patrón de flujo dentro de la sección del molde. Como ejemplo, la Figura 2.1 muestra patrones de flujo promediados en el tiempo dentro de un modelo típico del molde de colada continua con buza bifurcada. Se muestran los vectores de velocidad de la parte media para indicar las velocidades de flujo local y la dirección. Dicha figura compara los resultados de simulaciones numéricas que utilizan dos herramientas ampliamente utilizadas: Large Eddy Simulations (LES) por la izquierda y Particle Image Velocimetry (PIV) por la derecha. El método de PIV ilumina diminutas partículas colocadas en el flujo por medio de una hoja delgada de luz laser y compara las diferencias entre dos imágenes digitales de sus posiciones, tomadas solo unos microsegundos de diferencia, para calcular los

vectores de velocidad en cada punto. Se ha reconocido que los fenómenos transitorios causan la mayoría de los problemas de calidad durante la colada continua. El método LES es capaz de capturar de manera precisa los detalles del movimiento transitorio, lo cual no es posible con los métodos tradicionales κ - ϵ . El método logra esto a través de fuerza bruta computacional, es decir, resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en una malla muy fina utilizando pasos de tiempo muy cortos y “solvers” paralelos sofisticados, pero sin las ecuaciones de turbulencia.

Paralelamente, la gente de la industria del acero ha aportado al conocimiento del proceso de CC datos importantes gracias a la experiencia y observación del proceso. Por ejemplo, (Dauby Pierre H. 2011) menciona que durante aproximadamente 30 años se creía que el acero que salía de la boquilla bifurcada de la buza sumergida viajaba hasta las paredes angostas del molde chocando y provocando que se generaran dos zonas de recirculación únicamente. Sin embargo, a principios de la década de los 90's observaron que también es posible que se forme solo una zona de recirculación, o bien flujo inestable dependiente del tiempo. De hecho, el autor presenta una tabla donde se muestran los atributos de los distintos patrones de flujo y su impacto en la calidad del acero (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Fallas inherentes de cada patrón de flujo.(Dauby Pierre H. 2011)

DR (Double Roll), DR+ (Double Roll, no muy intenso), DR-(Double Roll, no muy débil), SR (Single Roll), U (Flujo inestable).		
Tipo de Flujo	Atributos de cada patrón de flujo	Impacto en la calidad del acero
DR+	1.-Adelgazamiento de la capa de escoria cerca de las caras estrechas del molde. 2.-Altas velocidades de menisco. 3.- Altas niveles de fluctuación.	1.- Falta de lubricación. 2.-Entrampamiento De fundente dentro del molde. 3.-Defectos superficiales.
DR	Distribución equitativa de la capa de escoria a lo largo del ancho del molde	Condiciones óptimas de vaciado, cantidad mínima de defectos.
DR-	1.- Meniscos fríos. 2.- Velocidades lentas de menisco. 3.-Insuficiente lavado del frente de solidificación.	1.-Ganchos largos de solidificación. 2.- Manchas de escoria en la superficie del planchón.
U	1.-Altas rapideces de menisco. 2.- espesores no uniformes de la capa de escoria. 3.-Altos niveles de fluctuación.	1.-Defectos superficiales. 2.-Capa no uniforme solidificada. 3.- Grietas longitudinales.
SR	1.- Adelgazamiento de la capa de escoria en la buza. 2.- Facilidad de movimiento de inclusiones y burbujas de argón hacia el interior del planchón.	1.- Grietas longitudinales. 2.- Otro tipo de defectos.

Unos de los pioneros en el estudio del efecto del flujo transitorio en problemas de calidad fueron Yuan, Thomas et al. 2004. Estos autores consideran que fluctuaciones excesivas del nivel del líquido en la superficie provocan que se interrumpa el suministro estable de escoria líquida hacia la brecha, causando variaciones en la transferencia de calor, dando como resultado diversos defectos como marcas de oscilación muy pronunciadas o inclusiones superficiales. En este trabajo se utilizó la técnica de LES, sin embargo como lo mencionan los autores, esta técnica es útil para generar conocimiento fundamental, no es muy útil como herramienta de diseño paramétrico, esto debido al alto costo computacional debido a la complejidad del fenómeno. Para validar las mediciones se utilizó un modelo físico con agua como fluido de trabajo y se empleó la técnica PIV para cuantificar las velocidades de flujo. Un aspecto muy importante de este artículo es que en él se abordan las diferencias que se presentan al modelar la parte del molde considerando únicamente la mitad del mismo, es decir, considerando que existe simetría entre ambas partes y por otro lado se consideran simulaciones del molde en su totalidad. Esto es muy importante ya que al trabajar con el molde en su totalidad se han dado cuenta que existe asimetría, y estas asimetrías provocan interacciones entre las dos mitades del flujo en el molde, causando comportamientos transitorios del flujo. Estas asimetrías provocan importantes efectos en la calidad del acero.

Ahora bien, lo más importante de obtener patrones de flujo es predecir cómo afectan al arrastre de escoria y su impacto en la calidad del acero.

Estos patrones de flujo turbulentos y dependientes del tiempo juegan un papel muy importante con respecto al transporte de impurezas que pueden generar inclusiones en el acero. Por ejemplo, (Yuan, Thomas et al. 2004) simuló el movimiento y captura de partículas en procesos de colada continua utilizando un enfoque Lagrangiano, basándose en los resultados de patrones de flujo publicados en la primera parte de su artículo. A través de este estudio los autores fueron capaces de identificar la influencia que tiene la turbulencia en el transporte de partículas. Observaron que las distribuciones asimétricas de partículas se deben a los efectos del flujo turbulento dependiente del tiempo y no debido a las condiciones interiores de los puertos de salida de la buza.

Otros estudios han dirigido su atención en el estudio de las fluctuaciones de la superficie libre del acero líquido en el molde. Estos estudios se han llevado a cabo, debido a que las zonas de recirculación superiores contribuyen a la formación de ondas superficiales y turbulencia. Esto puede tener como consecuencias como ya se mencionó, entrapamiento de escoria, inclusiones, entrapamiento de burbujas de argón entre otros. Una propuesta interesante es la de (Sahai 2006), quien propone el control de las ondas superficiales por medio de lo que se conoce como “Mold Flow Control Device”(MFCD, por su acrónimo en inglés), que consiste en sumergir dispositivos refractarios con determinadas geometrías para modificar la zonas altas de circulación y en general el patrón de flujo con el objetivo de disminuir dichas fluctuaciones en la superficie. En este estudio se presentan dos propuestas. Como se ve en las Figuras 2.2 y 2.3. El MFCD tipo A, se posiciona cerca de la superficie libre del líquido modificando la parte superior de recirculación. El MFCD tipo B, se coloca cerca de la salida de la buza; modificando ambas zonas de recirculación. El autor concluyó que el MFCD tipo B produce mejor control de las ondas superficiales. Sin embargo, dejó abierto el problema para explorar su implementación en la industria y ver si es posible llevarlo a cabo.

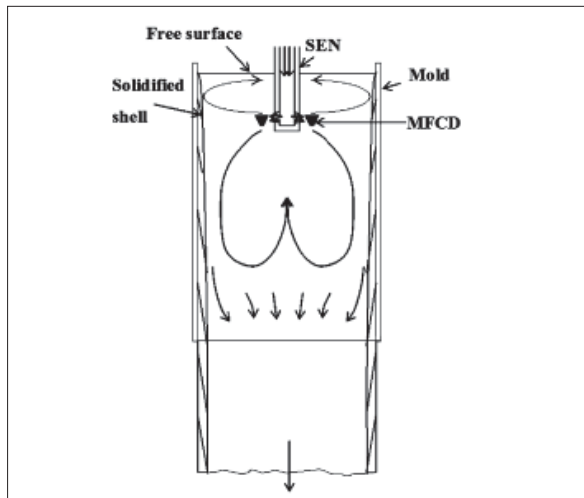


Figura 2.2 Esquema de patrón de flujo con MFCD "B"

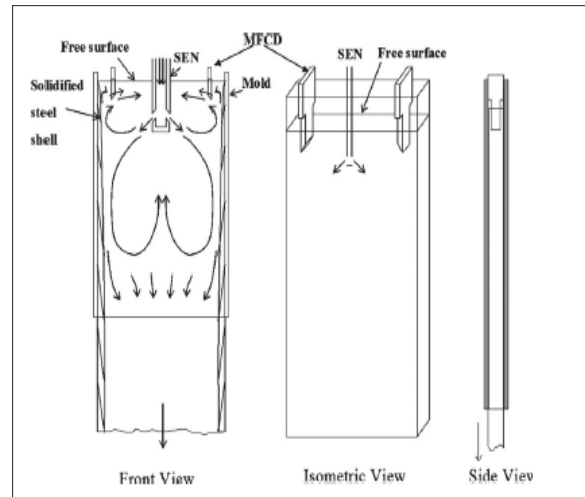


Figura 2.3 Esquema de patrón de flujo con MFCD "A"

Para comprender de manera más profunda el fenómeno de las ondas superficiales, (Real-Ramirez and Gonzalez-Trejo 2011) llevaron a cabo un estudio comparativo considerando un molde de colada continua estándar y un molde de colada continua tres veces más ancho, observando a diferencia de lo concluido en otros estudios, que en realidad, dentro del molde se forman cuatro vórtices en la zona de recirculación superior. Esto se logró debido a que se consideró un molde mucho más ancho donde es posible ver como se forman dichos vórtices. De este modo es posible observar y cuantificar la dirección de rotación y la interacción entre ellos. Así mismo, las frecuencias características del molde tradicional se pueden asociar a estos vórtices en la zona superior. Otro dato importante es que cerca de la superficie libre, el fluido pasa de un lado a otro debido a la interacción entre los vórtices, lo que origina dos vórtices cerca de la buza. Si la intensidad de estos vórtices es suficientemente grande, puede ocurrir un entrapamiento de escoria.

El estudio realizado por R. Kalter 2012 identificó tres tipos de comportamientos de la superficie libre, dependiendo de la profundidad de la buza y velocidad inicial del jet. Los autores mencionan que a profundidades menores de la buza dentro del molde de 0.07 m, se forma un patrón irregular de la superficie libre. A profundidades de la buza dentro del molde de alrededor de 0.09 m y velocidades del jet de 2.5 m/s, se crea un comportamiento consistente con ondas gravitatorias. Se observan tanto oscilaciones simétricas como antisimétricas de la superficie libre. A profundidades de la buza dentro del molde mayores a 0.1 m se observan oscilaciones asimétricas auto-sustentadas del jet dentro de la cavidad. Dependiendo de la velocidad inicial del jet, la superficie libre puede ser esencialmente plana u oscilante, con o sin atrape de burbujas. Las oscilaciones se forman debido a la interacción entre las distintas zonas de recirculación, ya que para un tiempo dado, existen dos zonas de recirculación débiles y dos zonas de recirculación fuertes. Las cuales interactúan debido al desbalance en cantidad de movimiento y gradientes de presión.

Los cálculos durante el procesamiento de acero demandan un conocimiento a priori del patrón de flujo. Esto último se logra de manera general por dos caminos, las mediciones experimentales y los cálculos numéricos. Mediciones confiables de los flujos durante el procesamiento de los aceros son

extremadamente difíciles debido a las altas temperaturas de operación entre otros aspectos. De aquí que la dinámica de fluidos computacional sea por lo tanto, el enfoque preferido. Esto no quiere decir que este enfoque no posea incertidumbre, en primera instancia al resolverse las ecuaciones de forma numérica se introduce un error, segundo, los cálculos de flujo en ocasiones requieren de constantes de rapidez, propiedades termofísicas, entre otras. Además, a menudo, se llevan a cabo considerables idealizaciones, las cuales de igual modo inducen incertidumbre.

3 Planteamiento del problema

La investigación consiste en resolver las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (ecuaciones de Reynolds) tridimensionales y dependientes del tiempo utilizando Fluent de ANSYS junto con el modelo $k-\epsilon$ de cerradura para el modelo a escala de CC utilizando una buza con geometría modificada, de tal modo que sea posible evaluar el comportamiento del patrón de flujo dentro del modelo de molde de CC y evaluar el impacto que tendrá dicha modificación en las fluctuaciones de nivel dentro del molde. Como mencionamos en la sección 1.1 el proceso de CC involucra no solo el fenómeno de flujo de fluidos, por el contrario, se trata de un fenómeno muy complejo que involucra también transferencia de calor, transferencia de masa, solidificación y además se trata de un problema multifásico. En este estudio solo se trata el problema de flujo de fluidos utilizando un solo fluido de trabajo.

4 Justificación

Hoy en día, la producción de acero de alta calidad sigue siendo económicamente considerable a pesar del desarrollo de nuevos materiales. Las tasas de producción del acero son altas, por ejemplo, en 2012 se produjeron $1,518,506 \times 10^3$ toneladas métricas en el mundo, de las cuales aproximadamente el 95% fueron producidas por colada continua. Sahai (2006) menciona que los costos netos aproximados por tonelada que se tiene que reprocesar es alrededor de \$100 usd. Por lo que evitar defectos por arrastre de escoria trae, de manera natural, ahorros considerables.

Existen básicamente dos modos de controlar las ondas superficiales. La tecnología que se utiliza generalmente es el freno electromagnético. Estos dispositivos emplean bobinas de corriente directa para generar un campo magnético estático para controlar el flujo dentro de la cavidad del molde. Emplean localmente 2 imanes en cada lado amplio del molde para crear zonas rectangulares de campo magnético estático cerca de los puertos de la buza. Este sistema se utiliza para disminuir y difundir el jet que sale de la buza con el objetivo de disminuir la velocidad del menisco y las fluctuaciones en el perfil del menisco (Ashburn, Baker et al. 2004).

La otra alternativa es utilizar deflectores. Como veremos en la sección siguiente, consiste en controlar las ondas superficiales modificando las zonas de recirculación superiores de modo que se puedan obtener menores ondas superficiales y turbulencia.

El uso de deflectores es una alternativa simple y poco costosa en comparación con el uso del freno electromagnético, ya que su uso trae consigo la alta sensibilidad a las condiciones de operación, son costosos y difíciles de operar. Por esta razón, lo que se propone en este trabajo de investigación es controlar las zonas de recirculación superiores a través de la modificación de la geometría externa de la buza, ya que de este modo se pretende limitar la interacción entre las dos mitades del molde. Por otro lado y como un medio adicional para minimizar la presencia de vórtices intensos en la superficie libre del líquido, se propone adherir deflectores a la buza sumergible.

Como ya se mencionó, el proceso de colada continua se lleva a cabo a temperaturas por arriba de los 1,500 °C y el volumen de material procesado es considerablemente grande (entre 60 y 250 T dependiendo de la capacidad de producción), lo que ocasiona que las mediciones experimentales sean difíciles de llevarse a cabo. Como una alternativa desde hace ya varias décadas se hace el uso de metodologías para resolver las ecuaciones de campo. De aquí que es posible generar simulaciones que generen resultados de manera económica, rápida y eficiente. Los resultados obtenidos de las simulaciones se pueden validar creando modelos físicos que tengan consistencia tanto cinemática como dinámica. Es por estas razones en esta investigación se hará uso de herramientas computacionales para resolver las ecuaciones de campo correspondientes para los distintos casos planteados.

Lo que se pretende con este trabajo de investigación es dar una alternativa viable al uso de los frenos electromagnéticos, que como ya se mencionó resultan costosos y difíciles de operar. Se buscará optimizar las variables que intervienen en la propuesta como lo son por ejemplo, el espesor, la longitud y la geometría del deflector, a través del análisis de las mismas.

5 Modelado matemático

La producción de acero en las distintas etapas de procesamiento del mismo (ej. Etapa de conversión, metalurgia de la olla, colada continua etc.) involucra interacciones entre varias fases, tales como metal, escoria, y gas, en las cuales el flujo de fluidos, la transferencia de masa, reacciones químicas etc, juegan todas un papel importante. Debido a esto la comprensión de los fenómenos que ocurren durante la fabricación de acero necesitan del conocimiento de varias disciplinas como lo son: termodinámica metalúrgica y fenómenos de transporte.

Sin embargo, como ya había mencionado en la sección 1.3 no es posible abordar un problema involucrando todos los fenómenos posibles, de aquí que solo se limitara a presentar las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos y el fenómeno de la turbulencia, ya que en este trabajo nos enfocaremos única y exclusivamente al fenómeno de flujo de fluidos dentro del molde de colada continua. Así mismo, como ya se mencionó dentro de la buza bifurcada se genera un régimen turbulento.

Los flujos dentro de los hornos, ollas, etc. se producen como consecuencia de distintas fuerzas que actúan sobre dichos sistemas, de aquí que mientras un jet supersónico de oxígeno incide sobre la superficie del acero líquido dentro del BOF para generar una agitación intensa, en una olla se genera una transferencia de momento de gran escala debido al jet de acero líquido descendente, generando de este modo corrientes de convección dentro de la misma. Interacciones entre gases inyectados y el acero líquido, mezclado de la escoria-metal produce flujos multifásicos, los cuales, en ocasiones son transitorios o inestables.

5.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

El flujo de un fluido es el resultado de las fuerzas que actúan sobre un elemento de fluido. La descripción cuantitativa de los flujos por ende comienza, con los principios de conservación del momento, es decir, al balance de momento sobre una partícula fluida. Esto se expresa de manera general, para un medio continuo, a través de la segunda ley de Newton:

$$\rho \frac{DU_j}{Dt} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \dots 5-1$$

donde $\Psi = gz$, donde g es la aceleración gravitacional, y z es la coordenada vertical.

Así mismo, la ecuación 5-1 satisface la ecuación de continuidad, la cual básicamente expresa un balance de materia sobre el elemento de fluido analizado:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \dots 5-2$$

Ahora bien, para poder caracterizar un fluido se requiere saber cómo responde éste a los esfuerzos. Tales esfuerzos pueden quedar descritos a través de ecuaciones constitutivas. Una de ellas es la ecuación que describe a un fluido newtoniano:

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dots 5-3$$

En la ecuación 5-3 el segundo miembro del lado derecho es el tensor de deformación (τ_{ij}), p la presión, μ la viscosidad y δ es la delta de Kronecker que representa al tensor identidad. Ahora bien, si se sustituye la ecuación constitutiva (3-3) en la ecuación de movimiento (3-1) se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{DU_j}{Dt} = \mu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_j} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \dots 5-4$$

Definiendo la presión modificada, p del siguiente modo:

$$p = P + \rho \Psi$$

y sustituyendo la expresión en la ecuación 5-4 se tiene:

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 U \dots 5-5$$

Donde $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática.

Estas ecuaciones junto con la ecuación de continuidad (5-2) forman un conjunto de 4 ecuaciones diferenciales parciales con cuatro incógnitas, es decir, las tres componentes de la velocidad y el campo de presiones (p). Estas ecuaciones representan un flujo newtoniano, tridimensional, incompresible y dependiente del tiempo, que en conjunto con condiciones iniciales y de frontera se resuelven para casos específicos. Dependiendo de la naturaleza del problema y de las restricciones que se impongan al mismo es posible simplificar las ecuaciones arriba mencionadas, sin embargo, dichas simplificaciones rara vez se pueden llevar a cabo de manera adecuada a sistemas que involucren procesamiento de acero, y por ende a menudo es necesario resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en función del tiempo y para sistemas tridimensionales.

5.1.1 Condiciones de frontera

El número de condiciones iniciales y de frontera sobre una variable dependiente se deriva notando el mayor orden de las derivadas en tiempo y espacio. Las condiciones iniciales y de frontera de un problema son específicas y por lo tanto varían de una situación a otra.

Las condiciones de fronteras se definen matemáticamente ya sea en base a componentes de la velocidad o sus gradientes sobre las fronteras del sistema. Las condiciones de frontera más utilizadas para modelar procesamiento de acero son, pared sólida, superficie libre, condición de no deslizamiento, flujo hacia dentro, flujo hacia fuera, entre otras.

5.1.2 Modelos de Turbulencia

El flujo turbulento es inherentemente tridimensional y dependiente del tiempo. Por lo que de manera natural se requiere de las ecuaciones de conservación presentadas. Debido a que los flujos turbulentos involucran movimientos tridimensionales de un amplio rango de tamaño de remolinos, se requiere del uso de mallas muy finas en los esquemas numéricos adoptados para resolver el movimiento turbulento a lo largo del amplio espectro de tamaños de remolinos. Esto requiere de grandes cantidades de memoria computacional y tiempo. En consecuencia, si se parte de las ecuaciones de Navier-Stokes, el cálculo de los flujos turbulentos no es práctico. Entonces en lugar de eso, se utiliza una forma promediada de las ecuaciones 5-1 y 5-4.

5.1.2.1 Ecuaciones de Reynolds

Una característica esencial del flujo turbulento es que el campo de velocidad varía significativamente e irregularmente tanto en posición como en tiempo. Podemos decir que el campo de velocidad de un flujo turbulento es aleatorio, sin embargo, se debe ser cuidadoso al definir que es aleatorio. Que un evento sea aleatorio significa solamente que puede llevarse a cabo o no. Que un campo de velocidad turbulento sea aleatorio significa solamente que éste no tiene un solo valor, cada vez que el experimento se repite bajo las mismas condiciones. Para ilustrar esto, la siguiente figura (Figura 5.1) presenta los valores de $U^{(n)}$ ($n=1,2,\dots,40$) que asume la variable aleatoria U en 40 repeticiones del experimento. La variable U representa la velocidad medida durante un experimento de flujo turbulento.

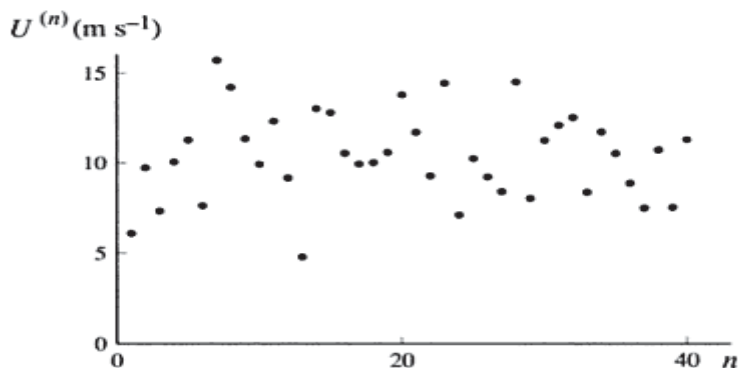


Figura 5.1 Bosquejo del valor de $U(n)$ de la variable aleatoria de velocidad U con respecto al número de repeticiones de un experimento de flujo turbulento

Lo que ahora nos concierne es resolver la consistencia entre la naturaleza aleatoria de los flujos turbulentos y la naturaleza determinística de la mecánica clásica involucrada en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para flujos laminares, se puede utilizar las ecuaciones de Navier-Stokes para calcular U (una componente particular del campo de velocidad a una posición y tiempo específicos), y a través de un experimento medir U . Las ecuaciones de Navier-Stokes se aplican igualmente a los flujos turbulentos, pero aquí el objetivo de la teoría es distinto. Ya que U es una variable aleatoria, su valor

es inherentemente impredecible: una teoría que predice un valor particular de U es casi seguro que será incorrecto. Por otro lado, sin embargo, una teoría puede determinar la probabilidad de que algún evento tal como $A = [U < 10 \text{ ms}^{-1}]$ ocurra, es decir, la probabilidad de que la variable aleatoria U asuma una velocidad menor a 10 ms^{-1} .

Ahora bien, comenzaremos con el análisis matemático para obtener la ecuación más elemental que gobierna al campo de velocidad promedio $\langle U(x, t) \rangle$. Primero se considera la descomposición de la velocidad $U(x, t)$ en su media $\langle U(x, t) \rangle$ y la fluctuación $u(x, t)$:

$$U(x, t) = \langle U(x, t) \rangle + u(x, t) \dots 5-6$$

De aquí se sustituye la ecuación de continuidad y se tiene la siguiente igualdad

$$\nabla \cdot U = \nabla \cdot (\langle U \rangle + u) = 0 \dots 5-7$$

Dado que $\nabla \cdot \langle U \rangle = 0$ y restando se tiene la siguiente igualdad

$$\nabla \cdot u = 0 \dots 5-8$$

Ahora bien, empleamos la ecuación 5-5 para escribirla en términos de la derivada material en su forma conservativa; tomando la media obtenemos:

$$\left\langle \frac{DU_j}{Dt} \right\rangle = \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \langle U_i U_j \rangle \dots 5-9$$

Ahora se sustituye la ecuación 5-6 para U_i y U_j , el término no lineal se vuelve:

$$\langle U_i U_j \rangle = \langle U_i \rangle \langle U_j \rangle + \langle u_i u_j \rangle \dots 5-10$$

De las dos ecuaciones previas (ecuaciones 3-9 y 3-10), se obtiene:

$$\left\langle \frac{DU_j}{Dt} \right\rangle = \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u_i u_j \rangle \dots 5-11$$

Este último resultado se puede re-expresar de manera conveniente definiendo la derivada material promedio:

$$\frac{\bar{D}}{\bar{D}t} = \frac{\partial}{\partial t} + \langle U \rangle \cdot \nabla \dots 5-12$$

En términos de la ecuación 5-12 la ecuación 5-11 queda expresada como:

$$\left\langle \frac{DU_j}{Dt} \right\rangle = \frac{\bar{D}}{\bar{D}t} \langle U_j \rangle + \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u_i u_j \rangle \dots 5-13$$

Utilizando este último resultado y promediando la ecuación 5-4 obtenemos la ecuación:

$$\frac{\bar{D} \langle U_j \rangle}{\bar{D}t} = \nu \nabla^2 \langle U_j \rangle - \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_j} \dots 5-14$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación promediada de Reynolds o ecuaciones de Reynolds promedio Pope (2000). El segundo término de la ecuación 5-10 se le conoce como esfuerzos de Reynolds. Al poner atención en la ecuación 5-14 se puede observar que son muy parecidas a las ecuaciones de Navier-Stokes, excepto por el término que involucra a los esfuerzos de Reynolds, lo cual, representa una diferencia importante ya que estos términos toman en cuenta el efecto de la turbulencia en el campo de flujo.

Evidentemente los esfuerzos de Reynolds juegan un papel crucial en las ecuaciones para el campo de velocidad promedio $\langle U \rangle$. Si los esfuerzos de Reynolds fueran cero, las ecuaciones para $U(x, t)$ serían las mismas que para $\langle U(x, t) \rangle$. El comportamiento distinto de $U(x, t)$ y $\langle U(x, t) \rangle$ es por lo tanto atribuible al efecto de los esfuerzos de Reynolds.

La ecuación promediada de Reynolds se puede reescribir del siguiente modo:

$$\rho \frac{D\langle U_j \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \langle p \rangle \delta_{ij} - \rho \langle u_i u_j \rangle \right] \dots 5-15$$

Esta es la forma general de una ecuación de conservación de momentum, siendo el término entre corchetes el que representa la suma de los tres esfuerzos: el esfuerzo viscoso, el esfuerzo isotrópico del campo de presión promedio, y el esfuerzo aparente que sufre del campo de velocidad fluctuante.

Para un flujo tridimensional, existen cuatro ecuaciones promedio que gobiernan el campo de velocidad promedio; es decir, los tres componentes de las ecuaciones de Reynolds junto con la ecuación de continuidad promedio o la ecuación de Poisson para $\langle p \rangle$. Sin embargo, estas ecuaciones poseen más incógnitas que ecuaciones, además del campo de velocidad promedio $\langle U \rangle$ y $\langle p \rangle$, existen también los esfuerzos de Reynolds. Esto es lo que se conoce como un problema de cerradura **proporcionar referencias**. En general, las ecuaciones de evolución (obtenidas de las ecuaciones de Navier-Stokes) para un conjunto de estadísticos contienen estadísticos adicionales que aquellos considerados en el conjunto. En consecuencia, en ausencia de información separada para determinar los estadísticos adicionales, el conjunto de ecuaciones no se puede resolver. Tales conjuntos de ecuaciones con más incógnitas que ecuaciones se dice no están cerrados. Es **decir, las** ecuaciones de Reynolds no se pueden resolver a menos que de algún modo se puedan determinar los esfuerzos de Reynolds.

5.1.2.2 Ecuación escalar promedio

Así como la descripción más elemental del campo de velocidad turbulento $U(x, t)$ se da por medio del campo de velocidad promedio $\langle U(x, t) \rangle$, la descripción más elemental de un campo escalar conservativo $\phi(x, t)$ se da por su media $\langle \phi(x, t) \rangle$. Esta ecuación se obtiene por medio del mismo procedimiento que se utilizó para obtener las ecuaciones de Reynolds.

$$\frac{\overline{D}\langle\phi\rangle}{\overline{D}t} = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \langle\phi\rangle - \langle u\phi' \rangle) \dots 5-16$$

Obviamente, los "fluxes" escalares juegan un papel análogo al papel que juegan los esfuerzos de Reynolds en las ecuaciones de Reynolds. En particular ellos dan lugar al problema de cerradura: aun cuando $\langle U \rangle$ sea conocido, la ecuación no se puede resolver para $\langle \phi \rangle$, si no se define $\langle u\phi' \rangle$.

5.1.2.3 Hipótesis de la viscosidad turbulenta y difusión de gradiente

En el desarrollo histórico de un campo científico, es usual que aparezcan una sucesión de modelos propuestos para describir los fenómenos a estudiar. A menudo, tal y como en el campo de los flujos turbulentos los modelos pioneros son simples, pero subsecuentemente se dan cuenta de su falta de contenido y falta de precisión predictiva. Los últimos modelos propuestos generalmente son superiores en contenido físico y en precisión predictiva, pero carecen de simplicidad. A pesar de sus deficiencias, es importante tener conocimiento de los modelos pioneros. Una razón es que dan la pauta para la comprensión de los fenómenos a través de ideas simples, también aportan un punto de referencia para comparar los modelos más complejos.

El vector de flux escalar $\langle u\phi' \rangle$ da tanto la dirección como la magnitud del transporte turbulento de la cantidad conservativa ϕ . De acuerdo a la hipótesis de difusión del gradiente, el transporte de ϕ en la dirección de máximo crecimiento, es decir, $-\nabla \langle \phi \rangle$ Pope (2000). De aquí que, de acuerdo a la hipótesis, existe un escalar positivo $\Gamma_T(x, t)$ llamado la viscosidad turbulenta tal que:

$$\langle u\phi' \rangle = -\Gamma_T \nabla \langle \phi \rangle \dots 5-17$$

Siendo la difusividad efectiva la suma de las difusividades turbulenta y viscosa:

$$\Gamma_{eff}(x, t) = \Gamma + \Gamma_T(x, t) \dots 5-18$$

De aquí que la ecuación conservativa escalar promedio junto con la hipótesis de difusión del gradiente se enuncia del siguiente modo:

$$\frac{\overline{D}\langle\phi\rangle}{\overline{D}t} = \nabla \cdot (\Gamma_{eff} \nabla \langle\phi\rangle) \dots 5-19$$

.

Matemáticamente, la hipótesis de difusión del gradiente es análoga a la ley de Fourier para la transferencia de calor o la ley de Fick para la transferencia de masa. De igual manera la hipótesis de la viscosidad turbulenta introducida por Boussinesq en 1877 es matemática análoga a la relación esfuerzo-deformación para un fluido Newtoniano. De acuerdo a esta hipótesis, la parte deviatorica de los esfuerzos de Reynolds es proporcional a la rapidez promedio de deformación,

$$-\rho \langle u_i u_j \rangle + \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \dots 5-20$$

Donde ν_T es la viscosidad turbulenta. La ecuación de movimiento promedio junto con la hipótesis de viscosidad turbulenta queda del siguiente modo:

$$\frac{D\langle U_j \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\langle p \rangle + \frac{2}{3} \rho \kappa \right) \dots 5-21$$

Esta es lo mismo que las ecuaciones de Navier-Stokes con $\langle U \rangle$ y ν_{eff} en vez de U y ν .

5.1.2.4 Modelo de turbulencia κ - ϵ

El modelo κ - ϵ pertenece a los modelos de dos ecuaciones, en los cuales las ecuaciones de transporte se resuelven para dos cantidades turbulentas, i.e. κ y ϵ . De estas dos cantidades se pueden generar una longitud de escala $L = \frac{\kappa^{3/2}}{\epsilon}$, una escala de tiempo $\tau = \frac{\kappa}{\epsilon}$ una cantidad de dimensión $\nu_T \frac{\kappa^2}{\epsilon}$, entre otras. En consecuencia, se pueden completar dos ecuaciones por lo que no se requieren especificaciones dependientes del flujo.

El modelo κ - ϵ es el modelo más utilizado, y se encuentra incorporado en la mayoría del software comercial de CFD. Como cualquier modelo de turbulencia, éste ha evolucionado con el tiempo; pero (Jones and Launder 1972) son los que oficialmente se les considera como los que desarrollaron el modelo, posteriormente (Launder and Sharma 1974) aportaron una mejora a los valores de las constantes del modelo. Posteriormente otros muchos autores han hecho contribuciones importantes.

El modelo κ - ϵ hace uso de la hipótesis de viscosidad turbulenta y de las siguientes ecuaciones:

1. Ecuación para κ (ecuación 5-26)
2. Ecuación para ϵ (ecuación 5-27)
3. La especificación de la viscosidad (ecuación 5-24)

5.1.2.5 Modelos de energía cinética turbulenta

Escribiendo la definición de la viscosidad turbulenta como:

$$\nu_T = l^* u^*, \dots 5-22$$

En el modelo de longitud de mezcla la longitud de escala es $l^* = l_m$ y la escala de velocidad es (en flujo cortante simple)

$$u^* = l_m \left| \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} \right| \dots 5-23$$

La implicación es que la escala de velocidad se determina localmente por medio del gradiente de velocidad promedio y, en particular, u^* es cero donde $\frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} = 0$. De hecho, contrario a esta implicación, existen diversas circunstancias en donde el gradiente de velocidad es cero aunque la escala de velocidad es distinta de cero.

De manera independiente, Kolmogorov (1942) y Prandtl (1945) sugirieron que es mejor basar la escala de velocidad con respecto a la energía cinética turbulenta, i.e.,

$$u^* = c\kappa^{1/2}, \dots 5-24$$

Donde c es una constante. Si la longitud de escala es una vez más la longitud de la teoría de longitud de mezcla, entonces la viscosidad se convierte en

$$\nu_T = c\kappa^{1/2}l_m \dots 5-25$$

Con el propósito de usar la **ecuación 5-25**, el valor de κ se debe conocer o estimar. Kolmogorov y Prandtl sugirieron hacer esto, resolviendo la ecuación que modela κ . Este es un modelo de una sola ecuación, ya que la ecuación se resuelve para una sola cantidad turbulenta, llamada κ .

El modelo tiene las siguientes características:

- i. La longitud de mezclado l_m se especifica
- ii. Se resuelve la ecuación de transporte para κ .
- iii. La viscosidad turbulenta se define por medio de la **ecuación 5-25**
- iv. Los esfuerzos de Reynolds se obtienen de la hipótesis de la viscosidad turbulenta
- v. Los esfuerzos de Reynolds se resuelven para $\langle U \rangle$ y $\langle p \rangle$.

De aquí que de la especificación de l_m **de las soluciones de las ecuaciones** que modelan, se determinan las siguientes cantidades: $\langle U \rangle$, $\langle P \rangle$, l_m , κ , ν_T y $\langle u_i u_j \rangle$.

Para fines prácticos, no se presenta el desarrollo de las ecuaciones mencionadas anteriormente debido a que el proceso de obtención de dichas ecuaciones es muy largo, sin embargo para un tratamiento completo ver Pope (2000).

$$\frac{\overline{Dk}}{\overline{Dt}} = -\nabla \cdot T' + \wp - \varepsilon \dots 5-26$$

donde

$$T'_i = \frac{1}{2} \langle u_i u_j u_j \rangle + \frac{\langle u_i p' \rangle}{\rho} - 2\nu \langle u_j s_{ij} \rangle \dots 5-27$$

La ecuación 3-21 es la ecuación que modela a k (la energía cinética turbulenta). En esta ecuación el término izquierdo y la producción \mathcal{P} se encuentran en forma “cerrada”. Por otro lado, los otros términos, es decir, ε y $\nabla \cdot T$ son desconocidos y, con el objetivo de obtener un conjunto de ecuaciones sin grados de libertad, estos términos deben ser modelados. Esto es, se postulan aproximaciones que modelen las incógnitas en términos de las variables requeridas.

A números de Reynolds altos la tasa de disipación ε es proporcional a $\frac{U_0^3}{l_0}$, donde U_0 y l_0 son las escalas de velocidad y longitud de la energía que contiene al movimiento. En consecuencia, es razonable modelar ε como sigue:

$$\varepsilon = \frac{C_d k^{3/2}}{l_m} \dots 5-28$$

Donde C_d es una constante del modelo. Las ecuaciones 3-23 y 3-20 se combinan para eliminar l_m y obtener la siguiente igualdad:

$$\nu_T = \frac{c C_D k^2}{\varepsilon} \dots 5-29$$

Para flujos cortantes simples, κ , ε y ν_T se pueden medir, de modo que esta aproximación del modelo se puede probar directamente. La Figura 5.2 muestra datos de DNS de flujo completamente desarrollado. Se puede observar que (excepto para zonas cercanas a la pared $y^+ < 50$) esta cantidad es de hecho aproximadamente constante, con un valor de alrededor de 0.09.

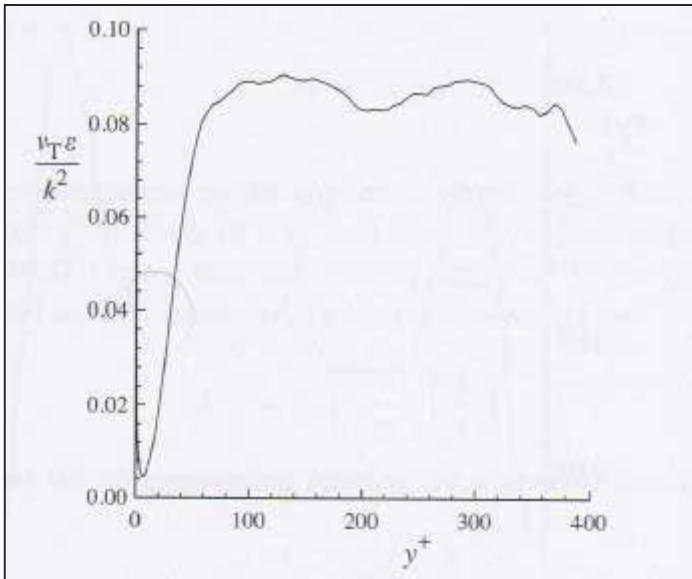


Figura 5.2 Perfil de $\frac{\nu_T \varepsilon}{k^2} = c C_D$ de una simulación DNS de flujo en canal con $Re=13,750$ (Kim et al. 1987)

La variable desconocida en la ecuación 5-21 es el flux de energía. Este se modela por medio de la hipótesis de la difusión del gradiente como:

$$T' = -\frac{\nu_T}{\sigma_k} \nabla k \dots 5-30$$

Donde el número turbulento de Prandtl para la energía cinética generalmente se toma como $\sigma_k = 1$. Físicamente, la ecuación 5-25 impone que (debido a las fluctuaciones de presión y velocidad) existe un flujo de k en la dirección de máximo crecimiento de k . Matemáticamente, el término asegura que el modelo resultante para k produzca soluciones suaves, y que las condiciones de frontera se puedan definir en k donde sea en la frontera del dominio de solución.

En resumen, la ecuación 5-21 que modela a k consiste en la ecuación siguiente:

$$\frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) + \rho - \varepsilon \dots 5-31$$

junto con las ecuaciones 5-23, 5-24 y la especificación de l_m .

5.1.2.6 Ecuación que modela ε

La ecuación para ε también se puede derivar, pero este no es un punto de partida útil para una ecuación de este tipo. Esto debido a que ε se interpreta mejor como rapidez de flujo de energía en la cascada, y se determina por medio de movimientos de escala grandes independientes de la viscosidad (altos números de Reynolds). En contraste, la ecuación exacta para ε pertenece a procesos en el rango disipativo. En consecuencia, en vez de basarse en una ecuación exacta, el modelo estándar para ε se interpreta mejor desde un punto de vista completamente empírico, esto es:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\rho \varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \dots 5-32$$

Los valores estándar de todas las constantes del modelo se publicaron en (Launder and Sharma 1974):

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

5.2 Análisis dimensional

5.2.1 Teorema de Pi-Buckingham

El teorema elemental del análisis dimensional es el llamado teorema de Pi-Buckingham, el cual se atribuye al ingeniero americano Buckingham (1914). Las siguientes suposiciones y conclusiones constituyen el teorema de Pi-Buckingham:

5.2.1.1 Suposiciones del Teorema

- i. Cierta cantidad u^1 se determina en términos de n cantidades medibles (variables y parámetros).

$$u = f(W_1, W_2, \dots, W_n), \dots \text{ 5-33}$$

donde f es una función desconocida de (W_1, W_2, \dots, W_n)

- ii. Las cantidades $(u, W_1, W_2, \dots, W_n)$ involucran m dimensiones fundamentales definidas por L_1, L_2, \dots, L_n . Por ejemplo, en un problema mecánico estas son usualmente las dimensiones fundamentales L_1 =longitud, L_2 =masa y L_3 =tiempo.

- iii. Sea Z la representación de cualquier $(u, W_1, W_2, \dots, W_n)$. Entonces la dimensión de Z , denotada por $[Z]$, es un producto de potencias de dimensiones fundamentales, en particular

$$Z = L_1^{\alpha_1} L_2^{\alpha_2} \dots L_n^{\alpha_n} \dots \text{ 5-34}$$

para algunos números reales, usualmente racionales, $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, los cuales son los exponentes dimensionales de Z . el vector dimensional de Z es el vector columna

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \dots \text{ 5-35}$$

se dice que una cantidad Z es adimensional si y solo si $[Z]=1$, i.e. todos los exponentes dimensionales son cero.

sea

$$b_i = \begin{bmatrix} b_{1i} \\ \vdots \\ b_{mi} \end{bmatrix} \dots \text{ 5-36}$$

el vector dimensional de W_i , $i=1,2,\dots,n$ y sea

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \dots \text{ 5-37}$$

la matriz dimensional $m \times n$ del problema dado

¹ En esta sección la variable u representa una función cualquiera en términos de variables cualesquiera

- iv. Para cualquier conjunto fundamental de dimensiones uno puede escoger un sistema de unidades para medir el valor de cualquier cantidad Z. Un cambio de un sistema de unidades a otro involucra un escalamiento positivo de cada dimensión fundamental la cual a su vez induce un escalamiento en cada cantidad Z. Bajo un cambio de unidades el valor de una cantidad adimensional permanece constante, i.e. su valor es invariante bajo cualquier escalamiento arbitrario de cualquier dimensión fundamental.

5.2.1.2 Conclusiones del análisis dimensional

- i. La ecuación 5.33 se puede expresar en términos de cantidades adimensionales
- ii. El número de cantidades adimensionales es $k=n-r(B)$ donde $r(B)$ es el rango de la matriz B. precisamente k de estas cantidades adimensionales dependen de las cantidades medibles (W_1, W_2, \dots, W_n) .
- iii. Sea

$$x^i = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ \vdots \\ x_{ni} \end{bmatrix} \dots 5-38$$

la representación de k soluciones linealmente independientes x del sistema

$$Bx = 0 \dots 5-39$$

sea

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \dots 5-40$$

el vector dimensional de u y sea

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \dots 5-41$$

La representación de una solución del sistema $By = -a \dots 5-42$

Entonces la fórmula 3-33 se simplifica a

$$\pi = g(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k) \dots 5-43$$

Donde π, π_i , son cantidades adimensionales,

$$\pi = u W_1^{y_1} W_2^{y_2} \dots W_n^{y_n} \dots 5-44 a$$

$$\pi_i = W_1^{x_{1i}} W_2^{x_{2i}} \dots W_n^{x_{ni}}, i = 1, 2, \dots, k \dots 5-44 b$$

Y g es una función desconocida de sus argumentos. En particular la ecuación 5.33 se transforma en:

$$u = W_1^{-y_1} W_2^{-y_2} \dots W_n^{-y_n} g(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k) \dots 5-45$$

De este modo la ecuación 5.45 nos da una relación en términos de cantidades medibles, y en términos experimentales la ecuación 5.45 es más económica en $r(B)$ órdenes de magnitud con respecto a la fórmula 5.33. De aquí la importancia del análisis dimensional. Por medio de esta relación es posible realizar experimentos y encontrar ecuaciones matemáticas en términos de números adimensionales que nos ayuden a encontrar correlaciones.

5.2.2 Números adimensionales de importancia en Mecánica de Fluidos

Las fuerzas involucradas en el estudio de los fluidos son las fuerzas de inercia, viscosidad, presión, gravedad, tensión superficial y compresibilidad. La razón de cualquiera de dos fuerzas será adimensional. Se pueden expresar cada una de dichas fuerzas del siguiente modo:

$$\text{Fuerza viscosa} = \mu V L$$

$$\text{Fuerza presión} = \Delta p L^2$$

$$\text{Fuerza de gravedad} = g \rho L^3$$

$$\text{Fuerza de tensión superficial} = \sigma L$$

$$\text{Fuerza de compresibilidad} = E_v L^2$$

Las fuerzas de inercia son importantes en la mayor parte de los problemas de la mecánica de fluidos. La razón entre la fuerza de inercia y cada una de las otras fuerzas listadas anteriormente, conduce a cinco grupos adimensionales.

en realidad para nuestro objetivo solo nos es de importancia el número de Reynolds. El número de Reynolds es la razón entre las fuerzas inerciales y fuerzas viscosas. Este número sirve para caracterizar que tipo de flujo tenemos, es decir, por medio del número de Reynolds podemos caracterizar si tenemos un régimen de flujo laminar o turbulento. El número de Reynolds se define por medio de la siguiente relación:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

5.2.2.1 Similitud de flujo y estudio de modelos

Para que sea útil, una prueba de modelos debe producir datos que puedan escalarse para obtener las fuerzas, momentos y cargas dinámicas que existirán en el prototipo a escala natural.

Los requerimientos para que estas condiciones se cumplan es que el modelo y el prototipo sean geométrica, cinemática y dinámicamente similares. A estas condiciones se les conoce como similitud geométrica, cinemática y dinámica, respectivamente Fox (1994).

- Similitud geométrica.- Requiere que el modelo y el prototipo sean de la misma forma, y que todas las dimensiones lineales del modelo se relacionen con las dimensiones correspondientes del prototipo por medio de un factor de escala constante.
- Similitud cinemática.- Dos flujos son cinemáticamente similares cuando las velocidades en puntos correspondientes están en la misma dirección y se relacionan en magnitud mediante un factor de escala constante. De tal manera, dos flujos que son cinemáticamente similares también tienen patrones de líneas de corriente que se relacionan por un factor de escala constante. Puesto que las fronteras forman las líneas de corriente límite, los flujos que son cinemáticamente similares deben de ser geoméricamente similares.
- Similitud dinámica.- Para establecer las condiciones requeridas para la similitud dinámica completa, deben considerarse todas las fuerzas que son importantes en la situación de flujo. Así, los efectos de fuerzas viscosas, de presión, entre otras deben de tomarse en cuenta. Es necesario establecer las condiciones de prueba de manera que todas las fuerzas importantes se relacionen mediante el mismo factor de escala entre los flujos del modelo y del prototipo. El teorema de Pi-Buckingham puede utilizarse para obtener los grupos adimensionales gobernantes para un fenómeno de flujo. Para alcanzar la similitud dinámica entre flujos geoméricamente similares, debemos duplicar al menos uno de esos grupos adimensionales.

6 Objetivos e hipótesis

6.1 Objetivo general

Disminuir el arrastre de escoria en el molde de colada para fabricación de planchón de acero mediante la modificación de la geometría externa de la buza para obligar que el patrón de flujo en el interior del molde sea cuasi-simétrico.

6.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la operación normal de la sección del molde en equipos de colada continua para la fabricación de planchón de acero.
2. Formular y evaluar numéricamente algunas modificaciones a la geometría externa de la buza del molde de colada continua, basándose en las características de la buza de planchón delgado.
3. Evaluar experimentalmente la mejor propuesta de buza en un modelo con agua como fluido de trabajo.

6.3 Hipótesis

La hipótesis central de este trabajo es que al modificar la geometría externa de la buza con las dimensiones adecuadas se evitará la interacción del fluido entre ambas partes del molde en la zona de recirculación superior reduciendo al mínimo las fluctuaciones de nivel que eventualmente pueden ocasionar arrastre de escoria.

7 Metodología

Se propone para esta investigación el uso de un modelo físico a escala para estudiar el comportamiento del flujo dentro del molde [referencia], las dimensiones del molde y de la buza se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7-1 Dimensiones del molde de referencia

Dimensiones de la buza (m)	
Longitud	0.37
Radio exterior	0.0254
Radio interior	0.0127
Radio de puertos	0.01
Dimensiones del molde (m)	
Longitud	0.5
Ancho	0.08
Altura	1.2

El desarrollo de la investigación consiste en generar simulaciones que reproduzcan el comportamiento del campo de flujo dentro del molde de colada continua para los distintos casos postulados.

7.1 Construcción de la geometría

La geometría del molde y de la buza se construyeron en el módulo “Geometry” de ANSYS, la buza y el molde se construyeron de manera independiente, es decir, primero se construyó el molde y luego la buza. Una vez construidas las geometrías se acoplaron de modo que la buza quedara centrada dentro del molde con una distancia de 10 cm del puerto de la buza al borde de la parte superior del molde.

A continuación, se definió la zona que representa al fluido de trabajo y por ende la zona que se utiliza para la simulación. Para ello, una vez acoplado el molde y la buza se procedió a realizar una sustracción del volumen de la buza que se encuentra en contacto con el fluido de trabajo de modo que se pueda tomar en cuenta, durante la discretización, la forma real del fluido de trabajo.

Es importante mencionar las ventajas que se tienen al utilizar el módulo “Geometry” de ANSYS, por ejemplo, al crear la geometría que representa el molde de colada continua, se tiene que generar en la parte inferior la salida del fluido de trabajo, esto se logra con una característica del programa que permite imprimir cierta geometría sobre otra. En éste caso específico se construyó una geometría redonda con radio de 1 cm donde se definió una condición de frontera. La otra característica que se utilizó fue aquella que permite generar la zona de fluido de trabajo dentro de la buza y el molde con la opción de retirar el volumen del sólido para tomar en cuenta de manera precisa únicamente la zona que representa al fluido de trabajo.

Una vez que se generó el modelo de referencia se construyó la buza con los deflectores de flujo tomando en cuenta las dimensiones de los distintos casos (ver Tabla 7-2). A continuación se procede a realizar el mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior. Ver Figura 7.1.

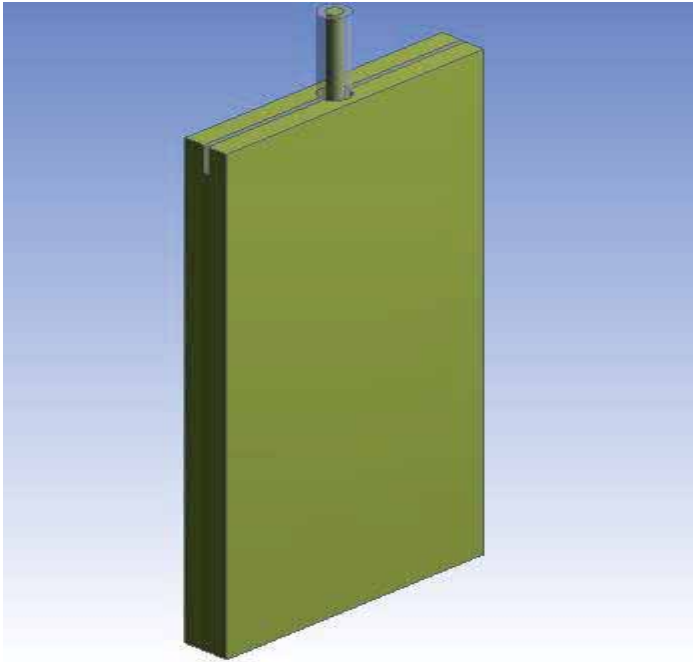


Figura 7.1 Se muestra como se sustrae el volumen de la buza de modo que solo se discretiza la parte fluida

Tabla 7-2 Modelo con deflectores.

Modelo con deflectores	Longitud del deflector ² (m)		Espesor del deflector (m)
	Caso 1	0	0.018
			0.006
	Caso 2	0.08	0.018
			0.006
	Caso 3	0.04	0.018
			0.006

7.2 Discretización

Una vez generado el modelo, se procede a la discretización de las geometrías para resolver las ecuaciones de campo necesarias. La discretización se llevó a cabo con un software comercial (Mesh de Ansys). El tamaño del elemento de menor tamaño fue de 1×10^{-5} m. La discretización se llevó a cabo con una rutina de generación de tetraedros. Se consideró una función de crecimiento para asegurar que el tamaño de elementos cerca de las paredes de la buza y de los deflectores tuviera

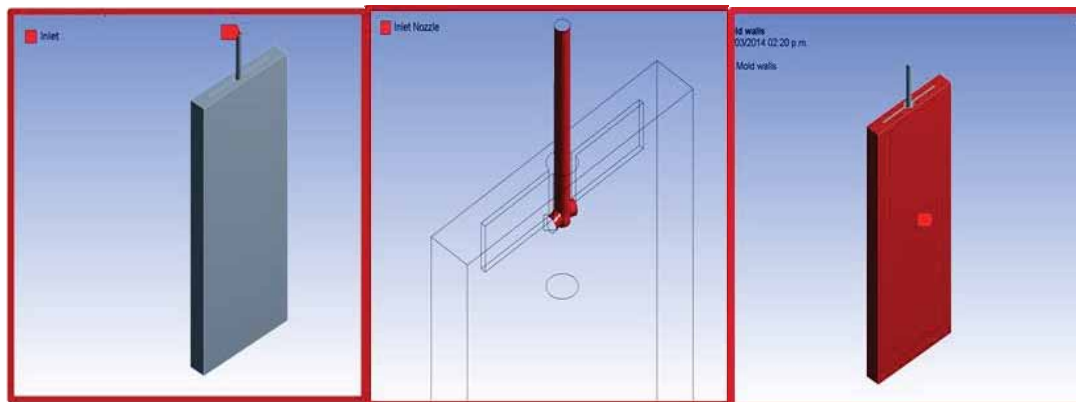
² La longitud aquí considerada se refiere al espacio que existe entre la pared angosta del molde y el deflector de flujo.

una mayor densidad de elementos. Para esto se consideraron los criterios de proximidad y curvatura.

7.3 Condiciones de frontera

Se consideraron las siguientes condiciones de frontera:

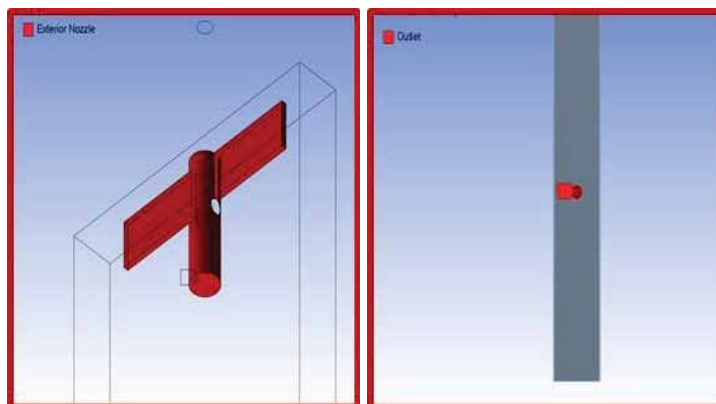
1. En la entrada de la buza se considera una condición de flujo constante (1.15 m/s) (Figura 7.12 a.)
2. En la pared interior de la buza se considera la condición de no deslizamiento (Figura 7.12 b)
3. En las paredes del molde se considera la condición de no deslizamiento (Figura 7.12 c)
4. En la pared externa de la buza y en los deflectores se considera la condición de no deslizamiento (Figura 7.12 d)
5. En la salida del molde se considera una condición de flujo (outflow) (Figura 7.12 e).



a) Condición de flujo constante

b) Condición de no deslizamiento

c) Condición de no deslizamiento



d) condición de no deslizamiento

Figura 7.2 Muestra la localización en el modelo de las condiciones de frontera

e) Condición de flujo

7.4 Solución del modelo

El sistema que tenemos que resolver es un sistema tridimensional, dependiente del tiempo y es turbulento. Además consideramos al fluido de trabajo como incompresible y newtoniano.

El enfoque que se utilizó para resolver el modelo es considerar las ecuaciones promediadas de Navier Stokes (ecuación 1.21), debido a que involucran la solución de las ecuaciones de Reynolds para determinar el campo de flujo promedio $\langle U \rangle$, los esfuerzos de Reynolds se obtienen de un modelo de viscosidad turbulenta. La viscosidad turbulenta se obtiene de cantidades turbulentas (κ y ϵ), para las cuales se resuelven las ecuaciones de transporte correspondientes, es decir, se resuelve el modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$ (ecuaciones 1.26 y 1.32).

El modelo se resuelve utilizando el software comercial Fluent de Ansys, con las condiciones de frontera mencionadas en el punto anterior para los distintos casos (Tabla 7-2) y para el modelo de referencia (Tabla 7-1).

7.5 Post-procesamiento

El post-procesamiento se llevó a cabo en el software comercial Tecplot. El post-procesamiento involucró la generación de los campos de velocidad en función a líneas de corriente y contornos de energía cinética turbulenta ver capítulo 8.

7.6 Validación

Los resultados numéricos del modelo matemático se validaron utilizando un modelo a escala utilizando agua a temperatura ambiente como fluido de trabajo. Por lo tanto, las dimensiones geométricas y las condiciones de frontera coinciden con la del modelo a escala.

El modelo a escala se construyó de acrílico transparente, el cual tiene forma rectangular con las dimensiones presentadas en la Tabla 7-1. Este se escaló en una relación 1:1/3. El agua se alimenta al modelo físico por medio de una bomba a través de la buza bifurcada por la parte superior. Las dimensiones de la buza también se presentan en la Tabla 7-1. Para asegurar la similitud dinámica basta con asegurar que los números de Reynolds del modelo y el molde de colada continua industrial sean iguales.

La validación consistió en hacer un análisis cualitativo de la fluctuación del nivel de la superficie libre comparando el modelo con y sin deflectores ver Figura 8.5 y Figura 8.6.

8 Resultados y análisis

Con el propósito de tener un punto de comparación se llevaron a cabo simulaciones considerando el molde de colada continua de referencia. En la Figura 8.1 podemos observar los resultados en estado estable; debido a que en estado estable se obtiene un promedio del comportamiento general del sistema, es fácil observar un comportamiento bastante simétrico.

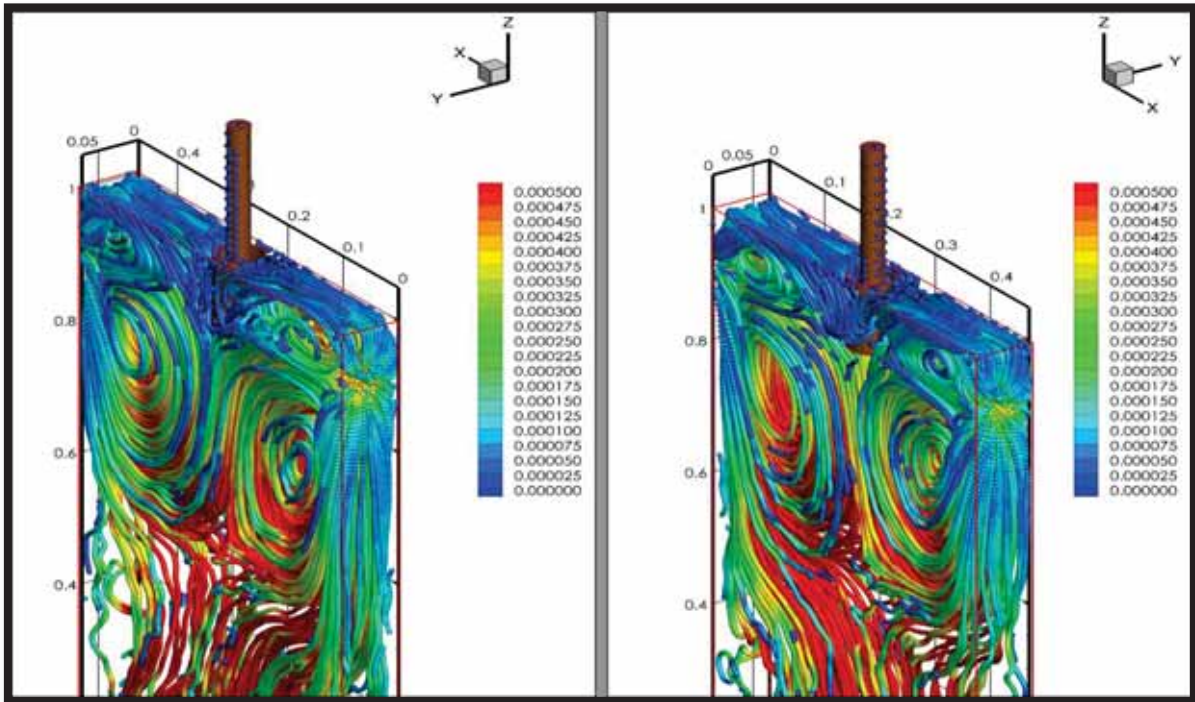


Figura 8.1 Modelo de referencia en estado estable. La escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.

Se observan las dos zonas de recirculación: La zona de recirculación superior y la zona de recirculación inferior. Este patrón de flujo obtenido se puede comparar con el mencionado en la sección 1, Tabla 2-1. Este comportamiento es el que nos da mejores resultados en referencia a la distribución uniforme de la escoria y por ende mínima cantidad de defectos. Los contornos de velocidad presentados en la Figura 8.2 muestran los resultados a distintas distancias desde la parte superior del molde (parte inferior de la figura) hasta la zona de los puertos de la salida (parte superior de la figura). En general se observa un comportamiento simétrico tanto en dirección x como en dirección y , los vectores nos permiten observar que la dirección de flujo es equitativa y no se observa una preferencia hacia alguna de las dos mitades del molde.

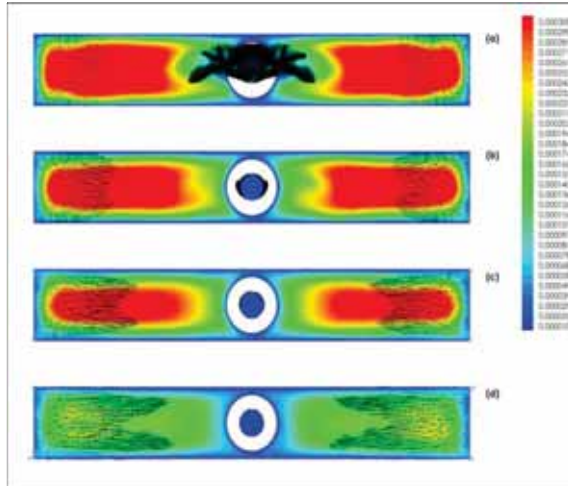


Figura 8.2 Contornos de velocidad para modelo de referencia en estado estable.

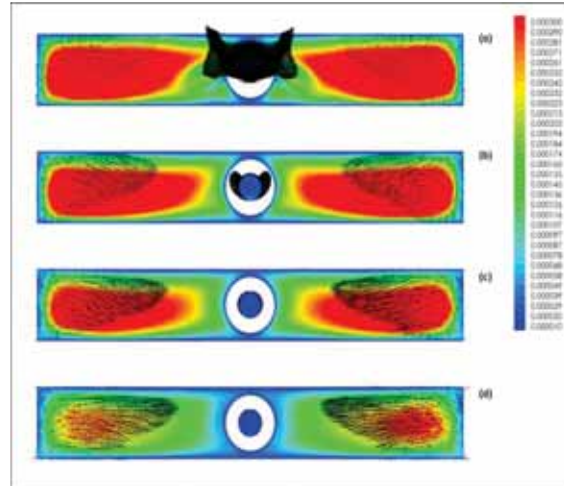


Figura 8.3 Contornos de velocidad para modelo de referencia en estado transitorio.

Si comparamos los resultados entre las simulaciones en estado estable y estado transitorio 30 s (Figura 8.4) solo se observan diferencias leves, sobre todo si comparamos los 3 casos en la zona superior de recirculación se notan diferencias entre la forma de los remolinos.

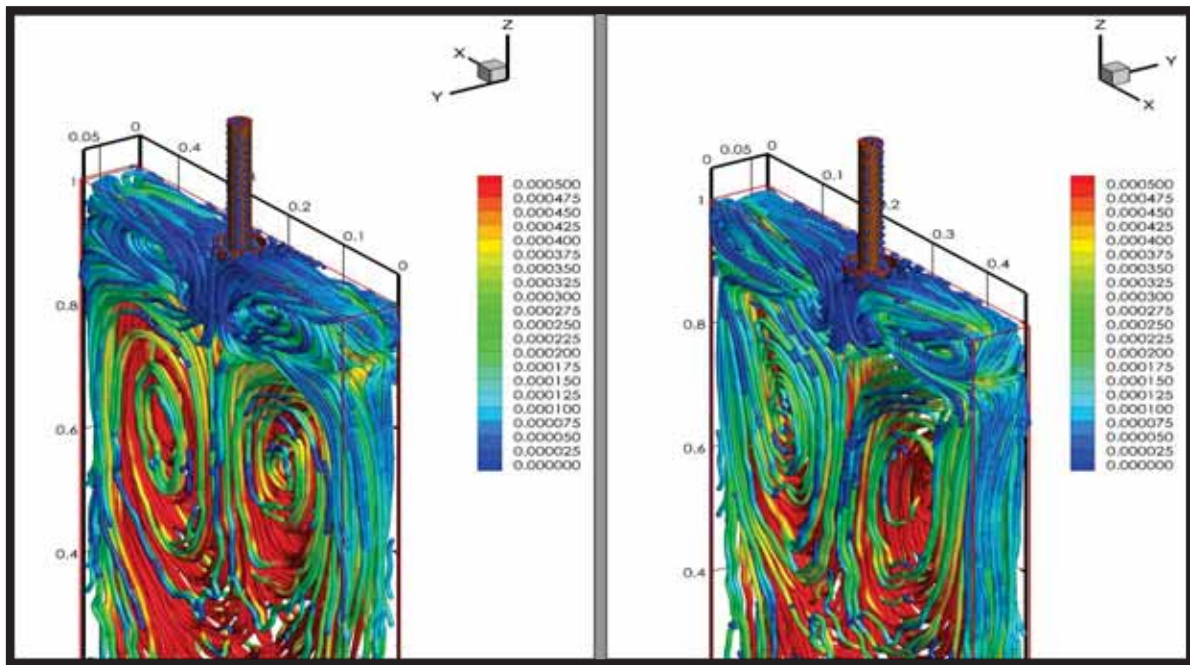


Figura 8.4 Modelo de referencia en estado transitorio (30 s). La escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.

Sin embargo, si ponemos atención a los resultados obtenidos en la figura 8.3 se puede observar una sutil pero clara diferencia entre ambos comportamientos, en la Figura 8.2 se puede ver claramente como los contornos de velocidad son bastante simétricos, así mismo los vectores de velocidad dibujados sobre los contornos nos muestran que no existe una preferencia en la dirección de flujo hacia alguna de las dos mitades del molde. En la Figura 8.3, sin embargo, se puede observar una ligera preferencia de flujo hacia una de las mitades del molde como los muestran los vectores de velocidad. Este efecto se ilustra de manera mucho más clara en las figuras 8.5 y 8.6. En la Figura 8.5 se ve claramente como el comportamiento del jet en estado estable es simétrico, es claro que el jet impacta a las paredes angostas del molde de igual manera a ambos lados, sin embargo, en la

Figura 8.6 podemos ver que el jet no impacta de manera simétrica en las paredes angostas del molde. Este tipo de comportamiento ya se ha reportado, se ha visto también que este patrón de flujo tiene una influencia determinante en el patrón de flujo de la parte superior del molde de colada continua (Najjar, Thomas et al. 1995). Así mismo, en las simulaciones físicas así como en planta se ha observado que el comportamiento es transitorio. Esto quiere decir que debido a la naturaleza misma del sistema, aún en presencia de una zona de doble recirculación siempre se presentarán asimetrías, tanto por razones operativas como razones puramente relacionadas a la naturaleza del sistema; en relación a esto también podemos mencionar el trabajo de (Kalter, Tummers et al. 2013), donde se hace hincapié de que a ciertas condiciones un jet bifurcado dentro de una cavidad presenta oscilaciones autosustentadas.

En la Figura 8.7 se muestran los resultados obtenidos para el campo de flujo dentro del molde de colada continua para el Caso 1, dicho caso representa el modelo de deflector considerando que el mismo ocupa todo el largo del molde. En principio se sabe, que tales dimensiones de deflector no se podrían aplicar a un caso real debido a que su presencia impediría la formación de la capa solidificada. Sin embargo, se realizaron las simulaciones debido a que las implicaciones teóricas que de ellas se deriven podrían ser importantes para el estudio del desempeño de los mismos. En la figura se pueden observar dos vistas, es decir, se puede apreciar tanto el comportamiento en la parte delantera como en la parte trasera del molde.

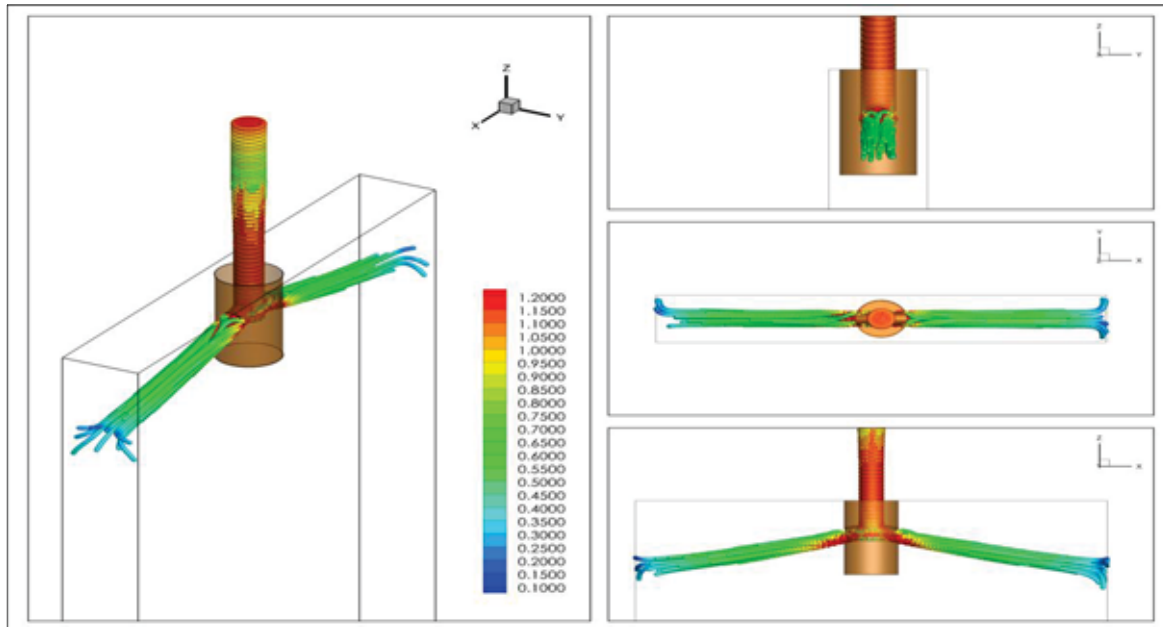


Figura 8.5 Muestra los resultados en estado estable del comportamiento del jet para el modelo de referencia

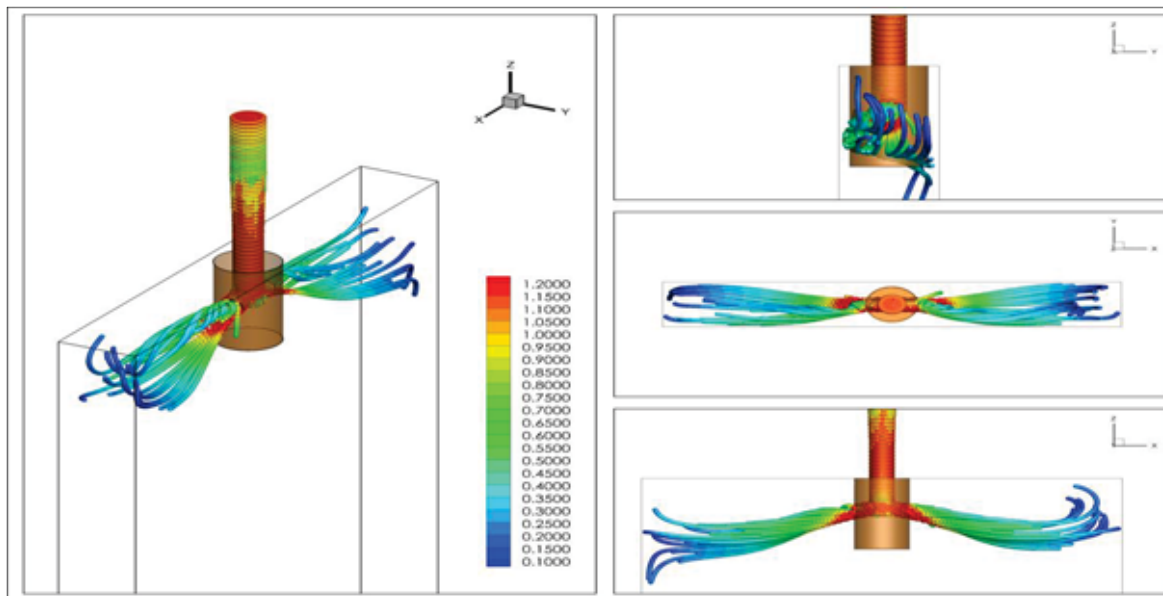


Figura 8.6 Muestra los resultados en estado transitorio del comportamiento del jet para el modelo de referencia

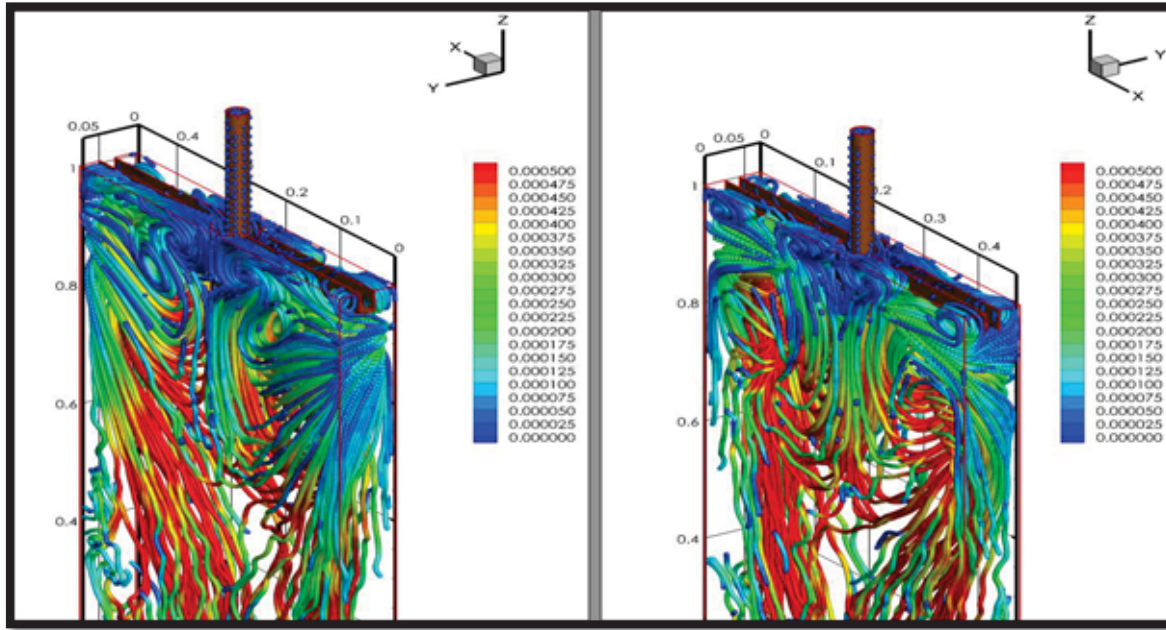


Figura 8.7 Campo de velocidad resultante para Caso 1, espesor de deflector 18 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.

En la figura se puede observar que en la parte superior, donde los deflectores están en contacto con el líquido se forman varias zonas de recirculación, en la parte superior izquierda de la parte frontal se puede observar la formación de dos zonas de recirculación; una muy cerca del puerto de la buza y otra más un poco hacia la izquierda y debajo de la ya mencionada. En la parte derecha del molde también se puede observar la formación de dos zonas de circulación, de igual manera se observa una zona de recirculación pequeña cerca del puerto de la buza y la otra situada un poco más hacia la derecha y debajo. Si se observa la figura en la parte trasera se pueden observar claramente cuatro zonas de recirculación. También se nota un comportamiento atípico de la zona debajo de la buza y los deflectores, se observa que la presencia del deflector de flujo con dichas dimensiones provoca que se generen remolinos con su eje principal de rotación paralelo al eje axial de la buza. Como vimos en la sección 1, Tabla 2-1 bien podríamos clasificar el patrón de flujo obtenido así, como un patrón inestable. Las desviaciones de lo que se ha visto tanto en planta como en simulaciones de que el patrón de flujo de zona de doble recirculación es el que da los mejores resultados en calidad de acero, se aleja mucho de lo obtenido con esta modificación. La Figura 8.9 también apoya los resultados descritos en la figura anterior, en dicha figura podemos observar que el flujo es altamente antisimétrica, podemos ver que la magnitud de la velocidad, sobre todo en la parte más cercana a la salida de los puertos de la buza (parte inferior de la figura) es mucho mayor en una de las mitades del molde que en la otra, lo mismo se observa a distintas alturas pero con menor intensidad. En la Figura 8.8 se muestran los resultados correspondientes para el Caso 1 pero con un espesor de deflector menos grueso. El comportamiento del campo de flujo es parecido al obtenido en la Figura 8.7, sin embargo no se observan cambios tan catastróficos como en dicha figura, aunque esto no quiere decir que los resultados sean favorables. En la parte frontal podemos ver dos zonas de recirculación claramente cerca de los

puertos de la buza, pero también se pueden observar pequeños remolinos con su eje de rotación principal paralelo a los deflectores, como en la parte superior derecha de la parte frontal. En la parte posterior se observan así mismo las dos zonas de recirculación cerca de los puertos de la buza. Por otro lado también se puede ver la formación de la zona de recirculación con su eje principal de rotación paralelo al eje axial pero con una intensidad menos pronunciada, pudiéndose observar la zona baja de recirculación un poco más parecida a lo considerado normal.

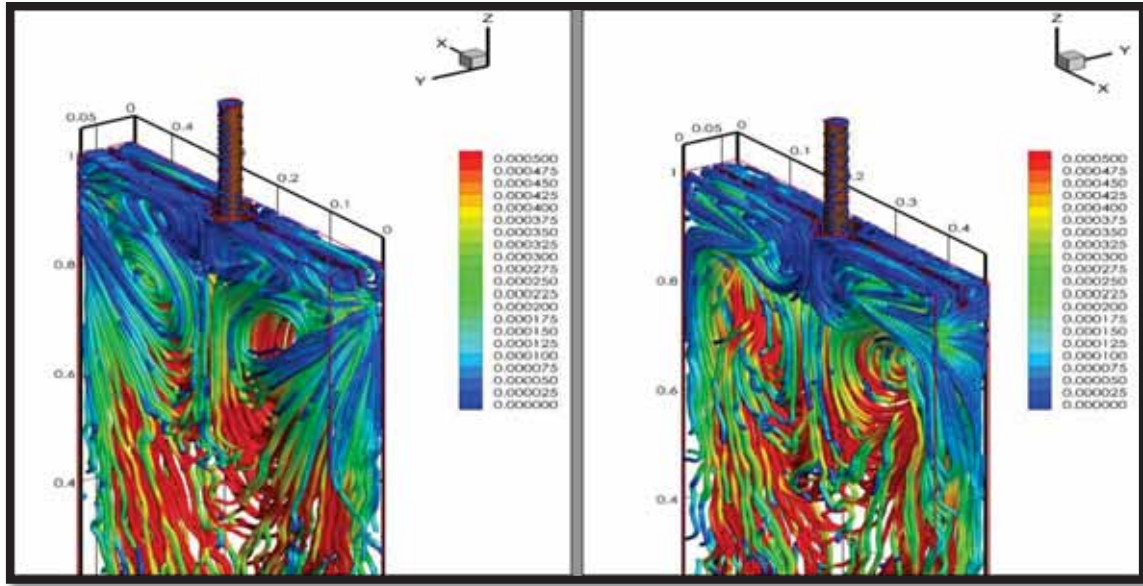


Figura 8.8 Campo de velocidad resultante para Caso 1, espesor de deflector 6 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.

En la Figura 8.10 podemos observar un comportamiento similar al presentado en la figura 8.9 pero con un efecto menos drástico, las antisimetrías causadas por la presencia de un deflector de flujo más delgado son menores, podemos ver que la diferencia de magnitud de velocidad entre una y otra mitad del molde de colada son menores.

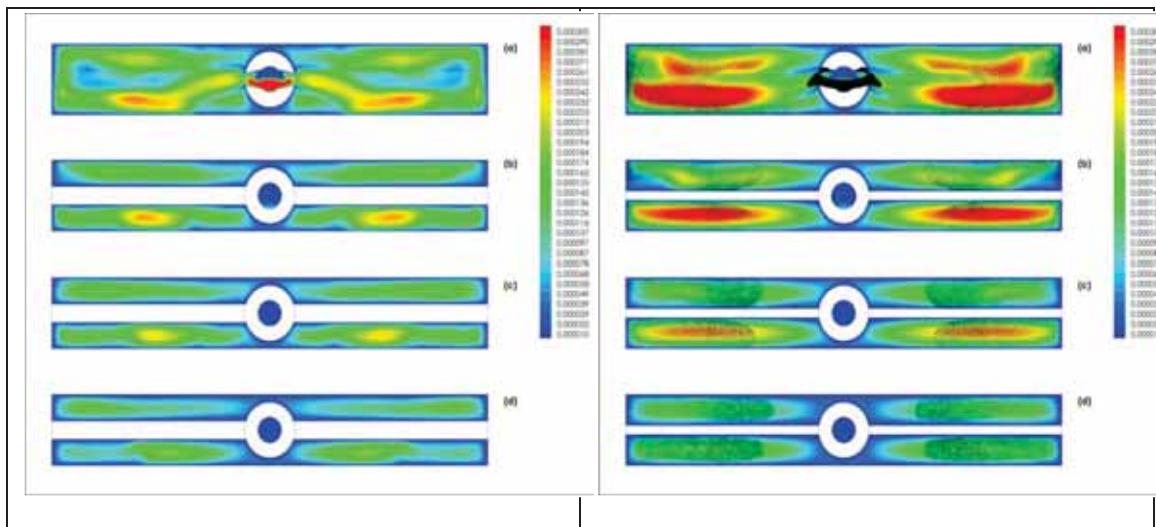


Figura 8.9 Contornos de velocidad para Caso 1, espesor de deflector 18 mm	Figura 8.10 Contornos de velocidad para Caso 1, espesor de deflector 6 mm

En la

Figura 8.11 se presentan los resultados de la simulación considerando una longitud reducida y un espesor grueso. Se observa en ambos lados del molde la formación de zonas de recirculación que tienen su eje de rotación paralelo al eje axial de la buza, en la parte superior derecha de la figura se puede ver claramente como la magnitud de velocidad se incrementa bastante. Así mismo se aprecia claramente un comportamiento completamente asimétrico entre las dos mitades del molde. En la parte superior del molde en su perspectiva frontal se aprecia la formación de dos zonas de recirculación cercana a la salida de los puertos de la buza mientras que desde la perspectiva trasera no se aprecian dichas zonas, además podemos observar como en la parte trasera tenemos una magnitud de velocidad mayor con respecto a la perspectiva delantera, es decir, parece ser que la presencia de los deflectores de flujo con este espesor provocara que el flujo tenga preferencia hacia una mitad del molde ocasionando un comportamiento asimétrico. También se observa fácilmente que la interacción entre las dos mitades del molde es fuerte, existe un apreciable intercambio de flujo entre dichas zonas.

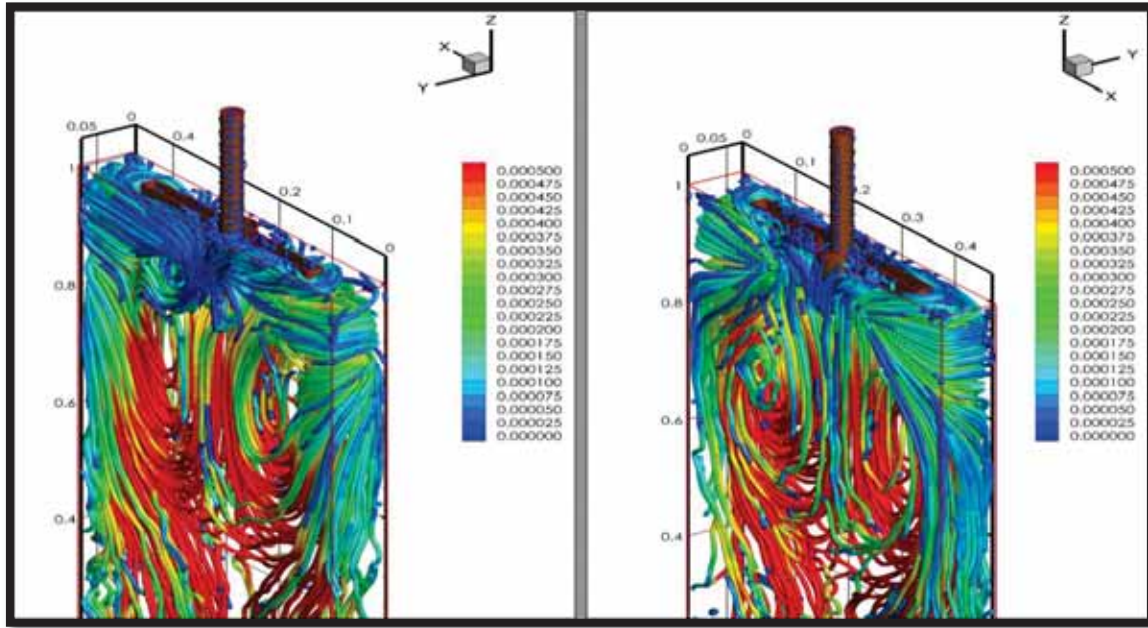


Figura 8.11 Campo de velocidad resultante para Caso 2, espesor de deflector 18 mm, la escala de colores representa la velocidad promedio del campo de flujo.

Sin embargo, si observamos la

Figura 8.13 podemos ver que la velocidad aumenta en dirección “x” y de aquí que se obtiene un comportamiento más parecido al obtenido para nuestro caso de referencia (Figura 8.2) donde se observa que la velocidad aumenta en dirección x. Esto al parecer indica que si se escoge una longitud entre la anterior y esta última podremos obtener mejores resultados.

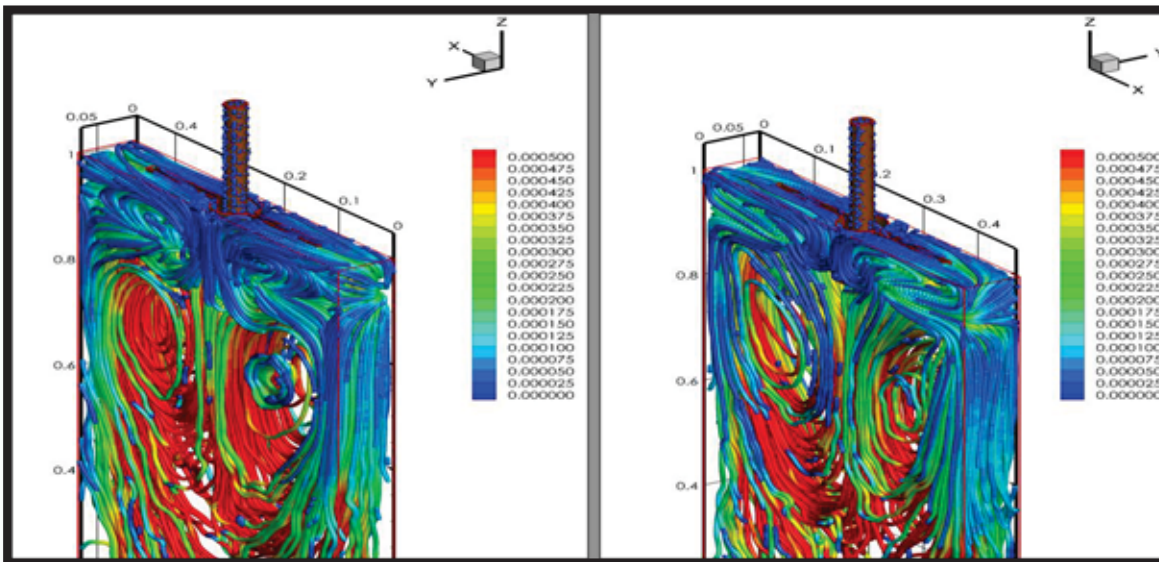


Figura 8.12 Campo de velocidad resultante para Caso 2, espesor de deflector 6 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se tienen los resultados de la simulación considerando la misma longitud de la Figura 8.8 pero con un espesor reducido. Se aprecian claras diferencias entre la Figura 8.8 y la Figura 8.11. En la parte baja podemos ver que la presencia de zonas de recirculación con eje de rotación paralelo al eje axial de la buza han desaparecido. La zona de recirculación de la parte baja se parece mucho más a la que se espera. En la parte superior podemos ver que el comportamiento es menos asimétrico que en el caso anterior, por ejemplo, se puede hablar de una zona de recirculación superior más uniforme y mucho menos fluctuante, no se observa la presencia de zonas de recirculación pequeñas

Sin embargo, si se observa la figura en la parte superior desde sus dos perspectivas se puede ver que existen zonas donde la magnitud de la velocidad es mayor desde una perspectiva que desde otra. Así mismo, se observa aún cierta interacción entre ambas mitades del molde. En la figura 8.14 se puede apreciar que el comportamiento es mucho más simétrico a lo largo de toda la longitud de análisis.

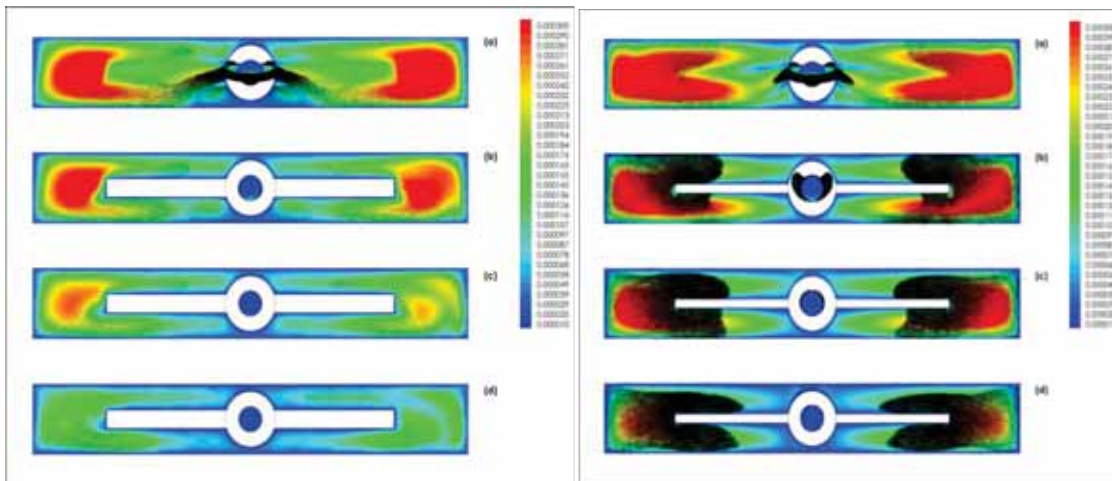


Figura 8.13 Contornos de velocidad para Caso 2, espesor de deflector 18 mm

Figura 8.14 Contornos de velocidad para Caso 2, espesor de deflector 6 mm

En la

Figura 8.15 se presentan los resultados de la simulación considerando una longitud intermedia entre los casos anteriores y un espesor de deflector grueso. Si comparamos los resultados correspondientes (mismo espesor) con los dos casos anteriores presentados se puede ver que el comportamiento tanto en la zona de recirculación inferior como en la superior se acerca más a lo que se busca, en esta figura no se aprecia en la parte inferior la formación de zonas con eje de rotación paralelo al eje axial de la buza. También si observamos la figura en la parte superior desde las dos perspectivas se puede notar que el comportamiento es mucho menos asimétrico, sin embargo dicho espesor de deflector parece provocar que el flujo se recargue hacia las paredes anchas del molde y de manera irremediable provoque comportamientos asimétricos, donde de manera natural el flujo tiende a inclinarse más hacia una mitad del molde más que a la otra. En la

Figura 8.17 se reafirma lo antes dicho, ya que podemos observar (parte inferior de la figura) que el flujo se recarga hacia una mitad del molde de colada continua.

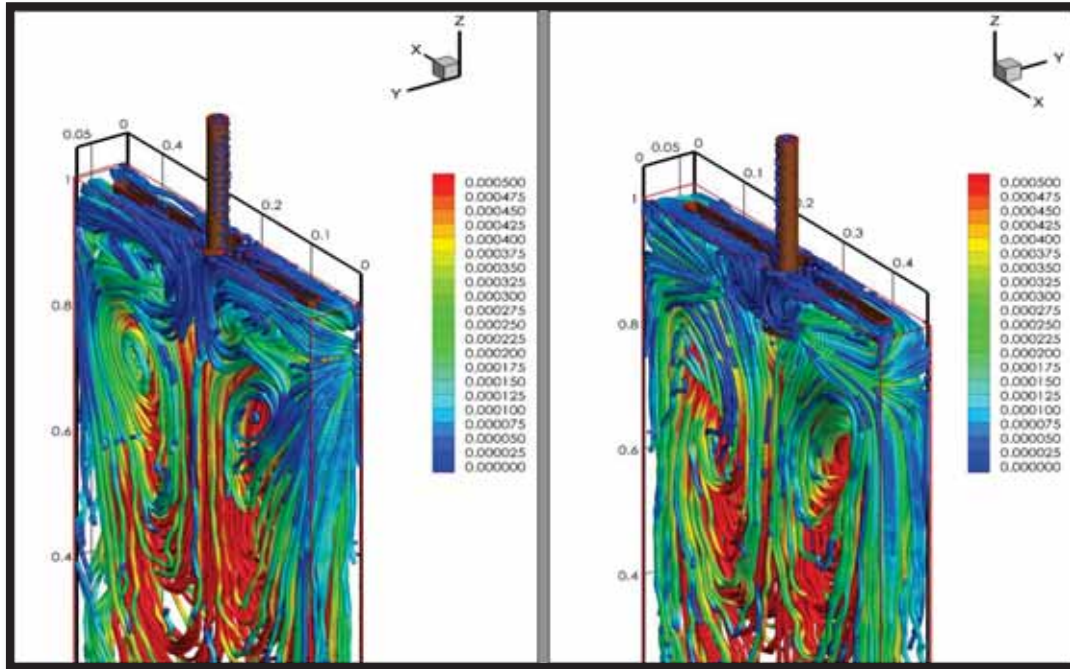


Figura 8.15 Campo de velocidad resultante para Caso 3, espesor de deflector 18 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.

En la

Figura 8.16 se presentan los resultados de la simulación considerando la misma longitud de la figura anterior pero con un espesor de deflector delgado. Estos resultados son alentadores, primero, en la parte inferior se puede observar la zona de recirculación clásica que se espera, por otro lado en la parte superior podemos ver que no existe la presencia de zonas de recirculación que causen fluctuaciones importantes a lo largo del molde, lo cual permitiría que las fluctuaciones en la superficie se eliminen. Se puede apreciar como un espesor de deflector delgado no presenta un obstáculo importante al flujo permitiendo que este se distribuya de manera cuasi-simétrica a lo largo del molde evitando que exista una parte preferente con respecto a las dos mitades del molde hacia donde el flujo se incline. En la

Figura 8.18 podemos observar un comportamiento cuasi-simétrico, la dirección de los vectores nos indica que el flujo no se recarga hacia ninguna parte distribuyéndose de manera adecuada, así mismo podemos observar como los contornos de velocidad en magnitud son mucho más parecidos a nuestro caso de referencia en estado estable.

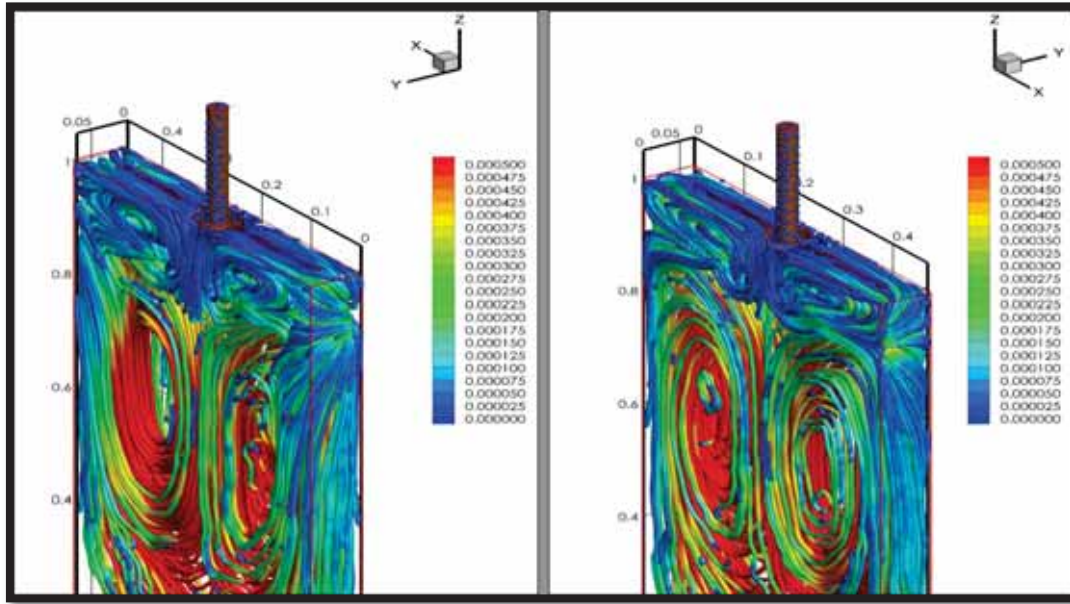


Figura 8.16 Campo de velocidad resultante para Caso 3, espesor de deflector 6 mm, la escala representa la velocidad promedio del campo de flujo.

Hasta este momento derivado de las simulaciones anteriores podemos ver que la presencia de un deflector delgado con dimensiones de longitud media entre el caso 1 y caso 2 nos da los mejores resultados. Observamos un patrón cuasi-simétrico, de aquí que este tipo de patrón tenga como consecuencia que la interacción entre las 4 distintas zonas de recirculación que surgen en la parte superior como se muestra en (Real-Ramirez and Gonzalez-Trejo 2011) se evite y por ende no se generen fluctuaciones de nivel.

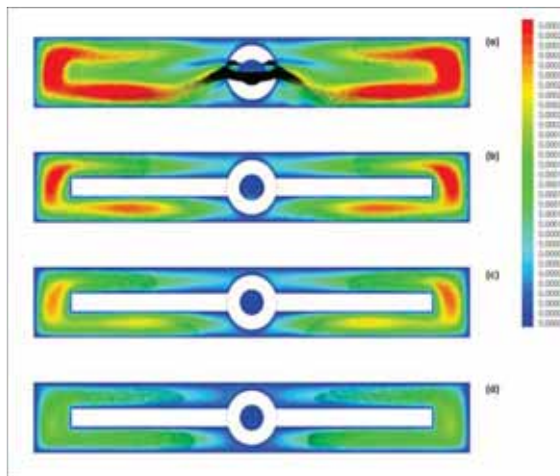


Figura 8.17 Contornos de velocidad para Caso 3, espesor de deflector 18 mm

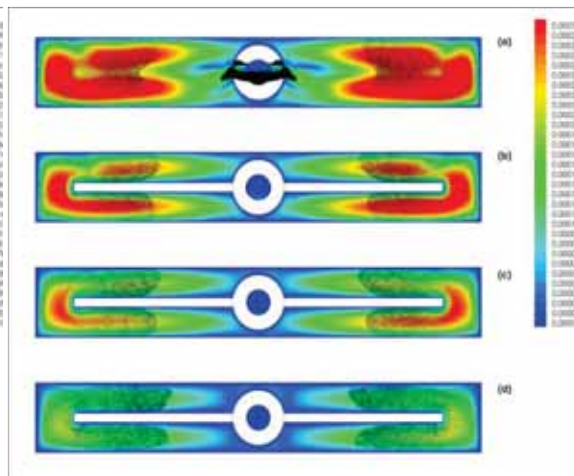


Figura 8.18 Contornos de velocidad para Caso 3, espesor de deflector 6 mm

En las simulaciones físicas realizadas en el molde a escala, podemos observar las fluctuaciones de nivel que surgen utilizando la buza bifurcada tradicional (ver Figura 8.19), en la

Figura 8.20 se aprecia claramente la diferencia entre la superficie libre generada en el molde con respecto al nivel en estado de reposo. Este tipo de fluctuaciones son las responsables de que en determinado momento puedan arrastrar escoria al seno del acero líquido.

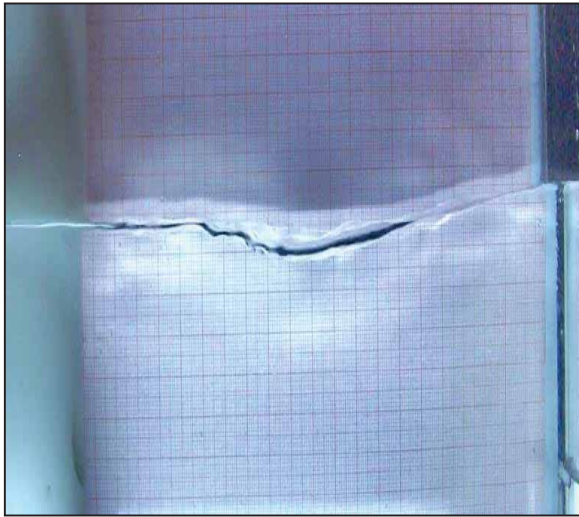


Figura 8.19 Superficie libre generada en el modelo físico usando una buza bifurcada tradicional

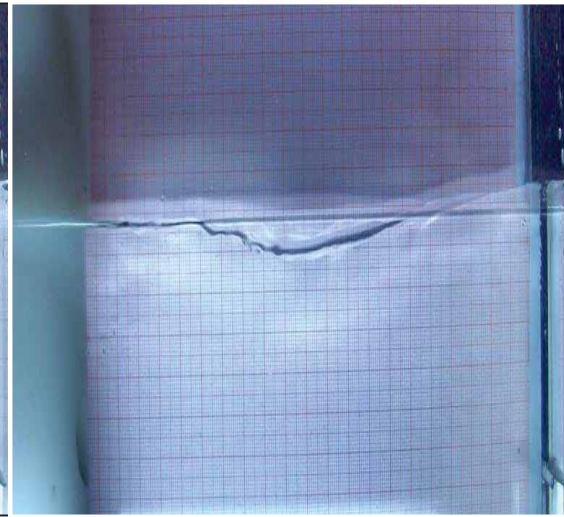


Figura 8.20 Superposición de la figura anterior y la superficie en reposo.

En la

Figura 8.21 se muestran las fluctuaciones de la superficie libre utilizando una buza bifurcada con deflectores de flujo, en la

Figura 8.22 se muestra al igual que en el caso anterior una comparación entre el nivel de la superficie libre y el estado en reposo. Los resultados son evidentes, se aprecia claramente como las fluctuaciones de nivel se reducen prácticamente a cero. Las simulaciones de la superficie libre del líquido no se consideran en este trabajo, sin embargo, estos resultados se pueden consultar en (Rivera-Perez, Real-Ramirez et al. 2014), como parte del trabajo de publicación del grupo de trabajo al que pertenezco.

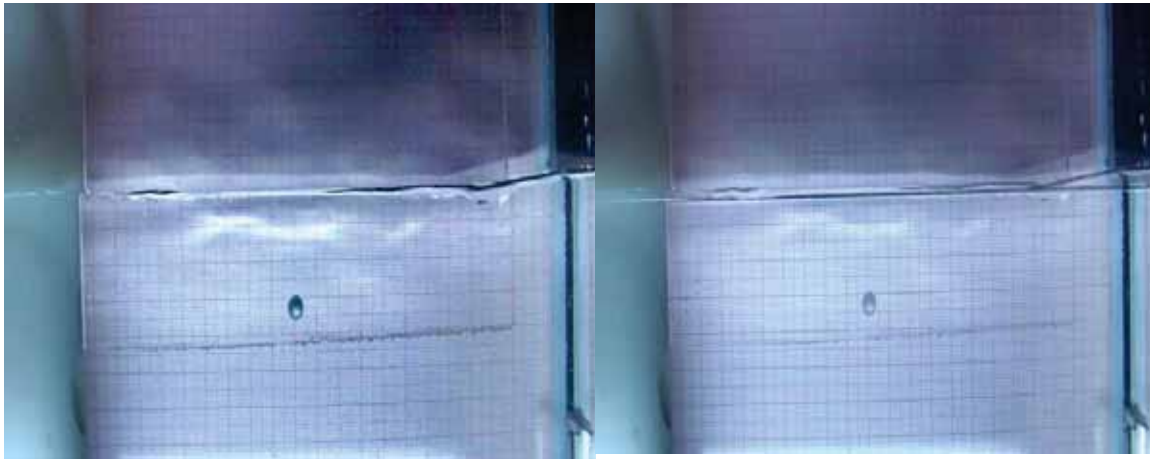


Figura 8.21 Fluctuaciones de nivel usando deflector (caso3)

Figura 8.22 Superposición de molde entre estado en reposo y usando deflector (Caso 3)

9 Conclusiones

Se concluye que el modelo tradicional de buza bifurcada dentro del molde de colada continua de acero, presenta asimetrías por su naturaleza física así como por las condiciones de operación particulares como lo pueden ser atascos de escoria dentro de la buza. Esto trae como consecuencia que puedan surgir arrastre de escoria que afecte la calidad del planchón de acero. La presencia de un deflector de flujo con las dimensiones correspondientes al caso 3, evita que las cuatro zonas de recirculación presentes en la parte superior del molde interactúen. De este modo se reducen las fluctuaciones de nivel presentes en el modelo de referencia permitiendo que se obtenga un comportamiento cuasi-simétrico. Este comportamiento cuasi-simétrico da como resultado que las fluctuaciones de nivel en el molde de colada continua se reduzcan de manera importante reduciendo al mínimo los posibles arrastres de escoria eventuales, evitando como consecuencia, que durante la solidificación puedan ocurrir entrapamientos de escoria que puedan ocasionar inclusiones, los cuales a su vez, den como resultado un deficiente desempeño del acero, aportando sitios de iniciación de grieta o de corrosión. Los estudios hasta el momento presentados aportan los argumentos necesarios para pensar en su posible implementación en la industria del acero como alternativa al uso del freno electromagnético.

Finalmente como conclusión final, se puede afirmar que la hipótesis planteada en este estudio se confirma, es decir, al utilizar deflectores de flujo con las dimensiones adecuadas reduce las fluctuaciones de nivel considerablemente.

10 Trabajo a futuro y perspectivas

Los resultados obtenidos hasta este momento son alentadores ya que como vimos las fluctuaciones de nivel se disminuyen casi a cero, sin embargo, si se espera su posible implementación en la industria del acero, se tiene aún un camino largo por seguir. En futuros trabajos se tienen que considerar los efectos que tienen estos cambios al flujo de calor y por supuesto, su influencia directa en la formación de la capa solidificada y el menisco. Recordemos que la formación de la capa solidificada y el menisco es fundamental como vimos en la sección 1.4.

En estos momentos, como continuación de las investigaciones correspondientes al tema, se están estudiando los fenómenos mecánicos que surgen por la interacción entre el fluido y la nueva estructura que se propone, esto con el propósito de iniciar el estudio de la integridad mecánica que debe poseer el nuevo dispositivo con el objetivo de soportar las drásticas condiciones de operación a las que se somete durante su uso en la fabricación de planchón de acero.

Es prudente mencionar que hoy en día la tendencia de producción de planchón de acero se realiza por medio de lo que se le conoce como colada continua de planchón delgado de acero [referencia, quien lo dice, evidencias???], el principio de funcionamiento es básicamente lo mismo, lo que cambia son las dimensiones del molde de colada continua y la forma de la buza ver Figura 10.1.

Como se puede observar en dicha figura la forma superior de la buza tiene una forma acanalada que interactúa con la zona superior de recirculación, si comparamos la forma de esta buza con el modelo propuesto en este trabajo se puede ver que existe cierto parecido. Si bien la propuesta es una aportación original la idea no es desconocida en el ámbito de la colada continua, esta referencia nos sugiere vamos por un camino correcto y sobre todo nos indica que su manufactura en determinado momento puede ser plausible. Existen fabricantes especializados como Vesuvius que se dedican entre otras cosas a la manufactura de dispositivos de flujo para metal fundido.

A futuro también se ha pensado en agregar un ángulo de inclinación a los deflectores propuestos con el objetivo de que los mismos sigan al fluido desde su trayectoria inicial inmediatamente después de salir de los puertos de la buza. Con esta nueva modificación se pretende que las asimetrías causadas de manera natural se reduzcan aún más que con la propuesta actual.



Figura 10.1 Figura que muestra la forma de la buza de planchón delgado

11 Bibliografía

Ashburn, R. E., M. A. Baker, et al. (2004). "AISTech 2004: Iron & Steel Technology Conference Proceedings": Volume I [y] Volume II : September 15-17, **2004**, Nashville, Tennessee, Association for Iron & Steel Technology.

Bluman, G. W. and S. Kumei (1989). Symmetries and differential equations. New York, Springer-Verlag.

Dauby Pierre H., R. D. (2011). "Real Flows in Continuous Casting." AIST Transactions **8**(6): 152-160.

Fox, R. W. and A. T. McDonald (1994). Introduction to fluid mechanics : SI version. New York, Wiley.

Fredriksson, H. and U. Akerlind (2006). Materials processing at casting. Hoboken, NJ, Wiley.

Jones, W. P. and B. E. Launder (1972). "The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence." International Journal of Heat and Mass Transfer **15**(2): 301-314.

Kalter, R., M. J. Tummers, et al. (2013). "Oscillations of the fluid flow and the free surface in a cavity with a submerged bifurcated nozzle." International Journal of Heat and Fluid Flow **44**(0): 365-374.

Launder, B. E. and B. I. Sharma (1974). "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc." Letters in Heat and Mass Transfer **1**(2): 131-137.

Najjar, F., B. Thomas, et al. (1995). "Numerical study of steady turbulent flow through bifurcated nozzles in continuous casting." METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B **26**(4): 749-765.

Pope, S. B. (2000). Turbulent flows. Cambridge ; New York, Cambridge University Press.

R.Kalter, M. J. T., S. Kenjeres, C.R. Kleijn (2012). "Oscillations of the fluid flow and the free surface in a cavity with a submerged bifurcated nozzle." International Journal of Heat and Fluid Flow.

Real-Ramirez, C. and J. Gonzalez-Trejo (2011). "Analysis of three-dimensional vortexes below the free surface in a continuous casting mold." International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials **18**(4): 397-407.

Rivera-Perez, F., C. Real-Ramirez, et al. (2014). "Bifurcated SEN with Fluid Flow Conditioners." Mathematical Problems in Engineering **2014**: 12.

Sahai, M. K. a. Y. (2006). "a simple innovation in continuous casting mold technology for fluid flow and surface standing waves control." ISIJ International **46**(12): 1823-1832.

Thomas, B. (2002). "Modeling of the continuous casting of steel—past, present, and future." METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B **33**(6): 795-812.

Yuan, Q., B. Thomas, et al. (2004). "Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: Part I. Fluid flow." METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B **35**(4): 685-702.

Yuan, Q., B. Thomas, et al. (2004). "Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: Part II. Particle transport." METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B **35**(4): 703-714.